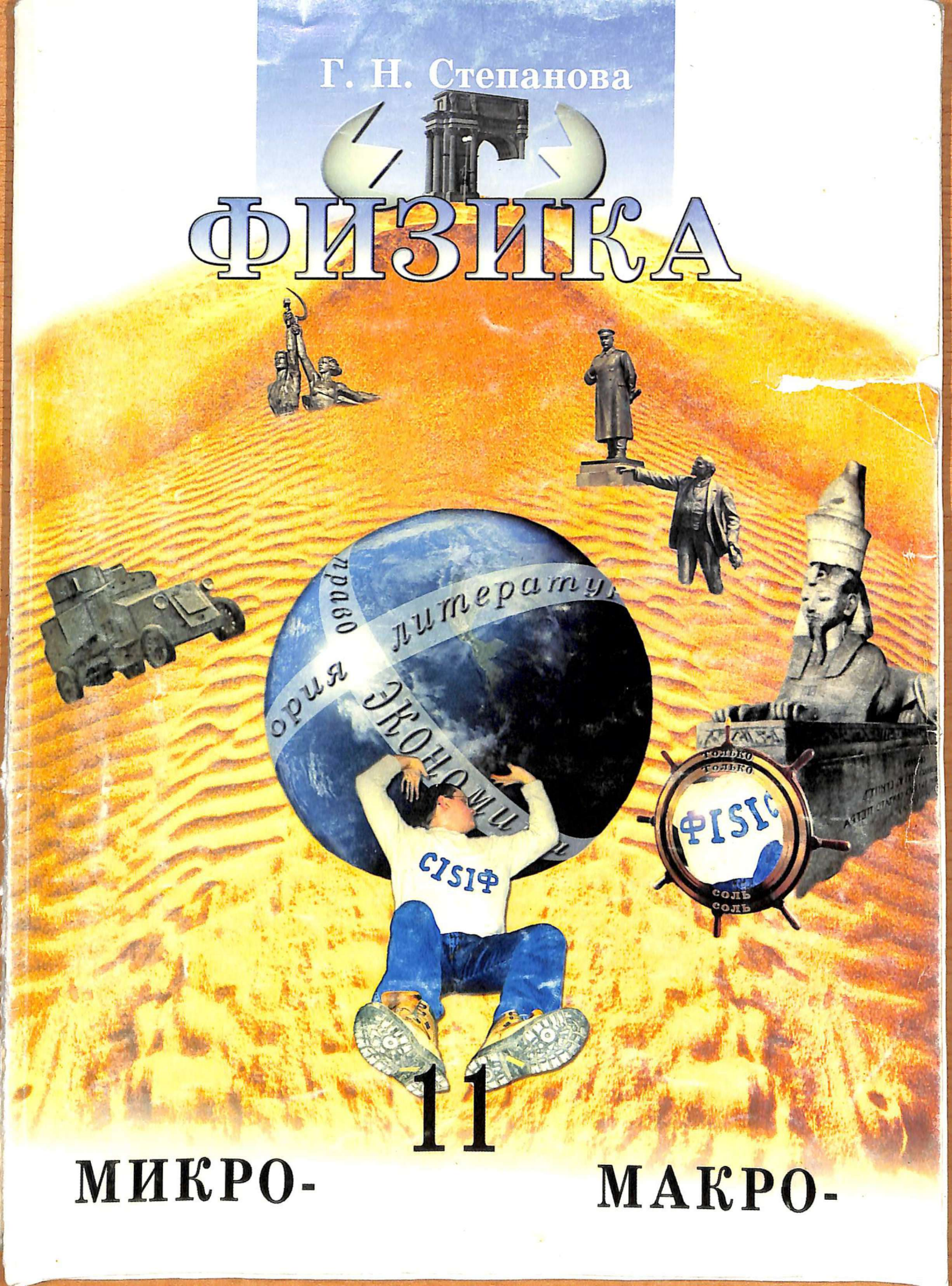
Г. Н. Степанова

ФИЗИКА



11

МИКРО- МАКРО-

ББК 74.262.22
УДК 373 53
С 79

*Все права на данное издание защищены,
любая форма использования копий издания целиком
или частями допускается только с разрешения автора
и издательства.*

Степанова Г. Н.
С 79 Физика. 11 класс. II полугодие: Учебник для общеобразовательных учреждений. — СПб.: ООО «СТП Школа», 2004.—224 с., ил.
ISBN 5-98198-006-0

УДК 373 53
ББК 74.262.22

ISBN 5-98198-006-0

© Степанова Г. Н. 2004
© Издательство «СТП Школа» 2004

квантовая физика

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Из курсов физики и химии основной школы вам известно, что от первоначального представления об атоме как о наименьшей неделимой, бесструктурной частице химического элемента ученым пришлось отказаться в конце XIX века, когда в науке накопилось значительное число экспериментальных фактов, свидетельствующих о сложном строении атома.

Среди них выделим те факты, обсуждение и объяснение которых мы уже проводили или еще будем проводить в рамках изучаемого курса физики.

Вспомните опыты по электризации тел. Исследователи установили, что любое тело можно наэлектризовать тем или иным способом. В этом процессе электрически нейтральные тела приобретают электрические заряды противоположных знаков и равные по значению, так что строго выполняется **закон сохранения электрического заряда**. Следовательно, внутри вещества (а оно состоит из атомов!) имеются положительно и отрицательно заряженные частицы.

Изучение процессов протекания электрического тока в газах привело английского физика Дж. Дж. Томсона в 1897 году к открытию **электрона**, первой элементарной частицы в физике, имеющей наименьший электрический заряд в природе. Другим результатом опытов Томсона стал вывод о том, что электроны являются обязательной составной частью атомов любых химических элементов. Следовательно, можно говорить о «строении атома».

К другим фактам, свидетельствующим о сложном строении атома, следует отнести закономерности, обнаруженные учеными при изучении спектров излучения света атомами разных химических элементов. Вам известно, что, находясь в газообразном состоянии, атомы химических элементов излучают свет при нагревании. Спектр такого излучения состоит из отдельных цветных линий — линейчатый спектр. При этом у каждого сорта атомов набор линий в спектре испускания — свой, он не зависит от того, каким способом «заставили» атомы испускать свет и каким образом (при помощи призмы или дифракционной решетки) разлагали свет в спектр.

Каждой линии в спектре излучения отвечает своя частота света. Значит, атомы одного химического элемента испускают свет строго определенных частот и они не совпадают с частотой света, испускаемого атомами других химических элементов. В этом смысле следует понимать утверждение, что «спектр атома —это его паспорт».

Но и это еще не все. Швейцарский учитель Я. Бальмер, обнаружил еще в 1885 году, что частоту линий в видимой части спектра атома водорода (а у каждого атома имеются линии, которые лежат и за пределами видимой части спектра, — в инфракрасной и ультрафиолетовой областях) можно рассчитать по формуле. Эту формулу он получил путем подбора, эмпирически:

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2}\right), \quad R = \text{const}, \quad k = 3,4,5,\ldots$$

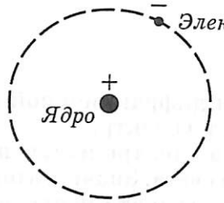
Формулы подобного вида вам хорошо известны. Если положить, что уменьшаемое и вычитаемое являются величинами, характеризующими состояния атома, то излучение света происходит когда состояние системы (атома) изменяется.

Поскольку эта формула выполняется с большой точностью, то можно полагать, что она отражает некоторую внутреннюю закономерность, присущую атомам.

Наконец, открытие А. Беккерелем явления радиоактивности в 1896 году утвердило исследователей во мнении, что атом не является неделимым, и проблема исследования внутреннего строения атома потребовала своего решения.

Открытие сложного строения атома стало важнейшим этапом развития и становления современной физики. В процессе создания количественной теории строения атома, позволившей объяснить все перечисленные выше и многие другие эмпирические закономерности, физики, отталкиваясь от классических теорий, открыли новые законы движения микрочастиц — законы квантовой механики, некоторые из которых теперь станут объектом нашего изучения.

§ 1. СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА



Атом водорода по Резерфорду

Орбита электрона

Каждый из вас, прочитав название параграфа, припомнит, что ему уже не раз приходилось слышать о строении атома. Слова «планетарная модель» сразу вызовут ассоциацию с Солнечной (тоже планетарной) системой. И вот вы уже уверенно говорите о том, что атом — это система, в центре которой находится атомное ядро, а вокруг него по замкнутым орбитам движутся электроны. Зачем же снова подробно обсуждать эту проблему?

Попробуем воспользоваться тем, что вам уже известно для того, чтобы восстановить в вашей памяти цепочку метода научного познания. Для нас важно не только познакомить вас с отдельными фактами или даже целыми теориями, но и показать, как научный метод познания позволяет получать ответы на самые непростые вопросы об устройстве окружающего нас мира. В свою очередь, знание этого метода поможет вам грамотно применять свои знания и строить рассуждения при решении задач.

Ученые не сразу пришли к современному представлению о строении атома после того, как были получены экспериментальные свидетельства о его сложном строении. Исследование строения атома началось, по-существу, с предположения **(гипотезы)**, что атом не является неделимым, а имеет сложное строение.

В состав всех атомов входят электроны. Они, кроме массы (хотя и очень небольшой по сравнению с массой большинства атомов), обладают электрическим зарядом отрицательного знака. Следовательно, внутри атома обязательно должны присутствовать положительно заряженные частицы. К слову сказать, в то время в 1906 году, когда Дж. Дж. Томсоном была предложена первая **модель** атома, протоны и другие положительно заряженные частицы еще не были открыты. Поэтому в модели атома Томсона фигурировали электроны, которые были, как изюминки в пудинг, вкраплены в **положительно заряженную субстанцию**, заполняющую весь объем атома.

Создание модели изучаемого объекта — это второй шаг на пути научного познания. Следующий шаг состоит в попытке объяснить при помощи данной модели имеющиеся в распоряжении ученого эмпирические (опытные) данные — факты.

Опытные (эмпирические) факты:

1. Атом практически вечен (устойчивая система);

2. Размеры атома имеют порядок 10^{-8} см;

3. Массы атомов лежат в интервале от $1{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг до $4{,}4 \cdot 10^{-25}$ кг;

4. Все вещества можно наэлектризовать;

5. Любые атомы можно ионизировать;

6. Ионы могут иметь положительный или отрицательный знак заряда;

7. Атомы всех химических элементов при определенных условиях могут испускать свет (электромагнитные излучения инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой части спектра);

8. Спектры испускания атомов — линейчатые, частоты линий спектра индивидуальны для каждого сорта атомов и подчиняются некоторым закономерностям;

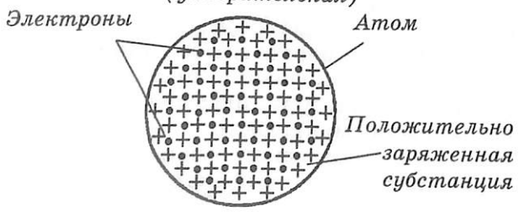
9. В состав атома обязательно входят электроны;

10. В обычном состоянии атом электрически нейтрален.

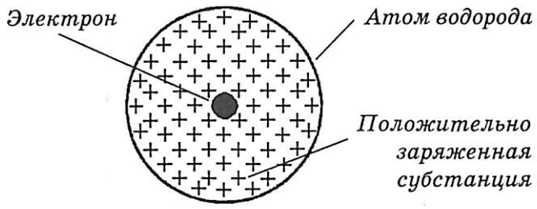
Гипотеза:

Атом не является неделимым, а имеет сложное строение.

Модель атома Дж. Дж. Томсона
(умозрительная)



Дж. Дж. Томсон
1856 — 1940



Модель атома Томсона

может объяснить:
опытные факты №1, 4, 5, 6, 7, 9, 10;

не может объяснить:
опытные факты № 2, 3, 8.

Экспериментальная проверка модели атома Томсона
должна дать ответы на такие вопросы:
1. Что такое «положительно заряженная субстанция»?
2. Как «положительно заряженная субстанция» распределена внутри атома?

Э. Резерфорд
1871 — 1937

Опыты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц атомами — опыты по экспериментальной проверке модели атома Томсона

Как вам известно, модель Томсона вполне удовлетворительно объясняла явление электризации и явление ионизации атомов, но не позволяла понять, что определяет размеры атома.

Она оказалась способной объяснить излучение света вполне определенной частоты атомами. Поясним это на примере простейшего атома — атома водорода. Модель атома Томсона выглядит так: положительно заряженная субстанция равномерно заполняет сферу радиусом около 10^{-8} см. В ее центре находится единственный электрон. В обычном состоянии он покоится.

Если же электрон вывести из этого состояния, то он начинает совершать колебания с некоторой собственной частотой. Следовательно, будет излучаться свет такой же частоты. Колебания через некоторое время прекратятся. Электрон вернется в положение равновесия и такой атом может существовать неограниченно долго, что соответствует действительности.

Однако, в спектре испускания атома водорода имеется не одна, а множество линий. Их появление модель атома Томсона объяснить не может.

Обратите внимание: предложенная Томсоном модель может объяснить только некоторые, а вовсе не все экспериментальные факты, относящиеся к атому. Кто-то из вас может высказать мнение, что пользы от такой модели немного. Но это не так, ведь она позволила сформулировать следующий вопрос, уточняющий предыдущий: что такое «положительно заряженная субстанция» и как она распределена внутри атома? А вот найти ответ на этот вопрос можно только путем постановки специальных опытов, а не умозрительно.

Такими опытами явились опыты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. С этими опытами вы также знакомились в курсе физики основной школы. Поэтому в левом столбце мы приводим схему опытов Резерфорда с небольшими пояснениями. Здесь же обратимся к сути этих опытов, которые сыграли в развитии атомной физики ключевую роль.

Чтобы исследовать, как распределен внутри атома положительный заряд, нужно уметь «проникать» внутрь атома. Термин «проникать» не следует понимать формально: нужны частицы, которые имели бы размеры, сравнимые с размерами исследуемых атомов, чтобы можно было утверж-

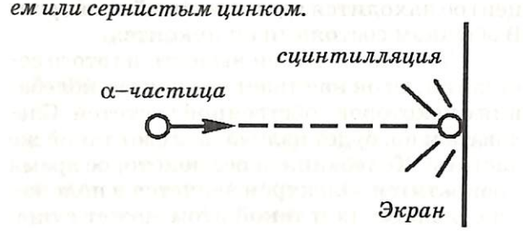
Параметры α–частицы:

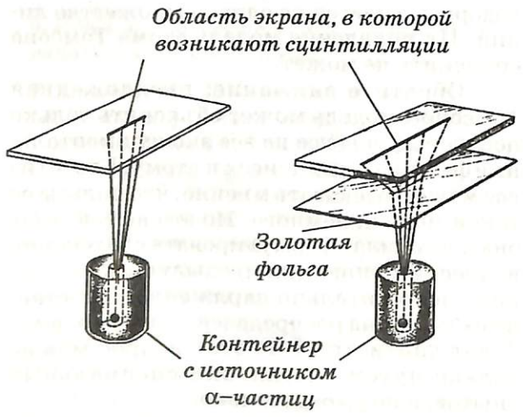
$m_\alpha = 6{,}8 \cdot 10^{-27}$ кг;

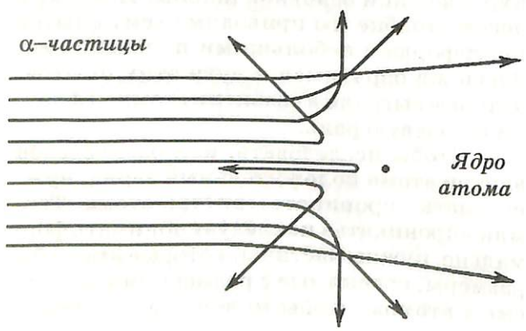
$q_\alpha = +\,3{,}2 \cdot 10^{-19}$ Кл;

$v_\alpha = 1{,}5 \cdot 10^{7} \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Метод регистрации α–частиц — визуальный: *проводится подсчет числа сцинтилляций (вспышек света), возникающих при «ударе» α–частицы в экран, покрытый сернистым барием или сернистым цинком.*







дать, что в опытах наблюдается взаимодействие этой частицы именно с единичным атомом, а не целой группой атомов.

Эти частицы должны иметь положительный заряд, чтобы испытывать отталкивание со стороны положительной части атома. Эти частицы должны обладать значительной энергией (большой скоростью), чтобы покинуть пределы тела, изготовленного из исследуемого вещества.

Наконец, эти частицы нужно уметь «увидеть». И в этом случае слово «увидеть» не следует понимать в буквальном смысле. Ведь микроскопические объекты, имеющие размеры атомов, глазу недоступны. Зато глаз, как вы помните, способен зарегистрировать слабую вспышку света, которая возникает при взаимодействии альфа-частицы с некоторыми веществами — **сцинтилляции.**

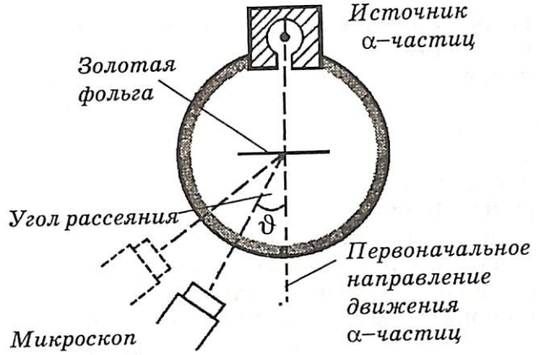
Вот теперь понятно, как нужно поставить опыт. Во-первых, нужен источник альфа-частиц. Им являлась крупинка радиоактивного радия. Чтобы выделить узкий пучок альфа-частиц, использовался экран со щелью (диафрагма). Во-вторых, нужны исследуемые атомы, которые находились бы «во вполне определенном месте», значит, нужно брать вещество в твердом состоянии.

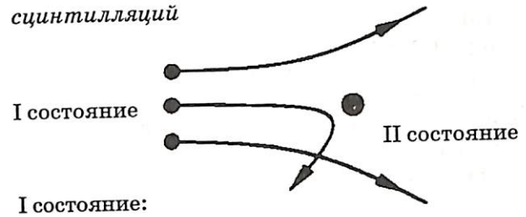
Однако, альфа-частицы быстро поглощаются даже воздухом. Следовательно, нужно откачать воздух из сосуда, в котором размещен источник альфа-частиц, и исследуемое вещество раскатать в очень тонкую фольгу. Такую тонкую, чтобы альфа-частицы проходили бы через нее насквозь. Проще всего изготовить фольгу из пластичного металла, например, золота.

Наконец, в-третьих, нужно иметь экран, покрытый веществом, способным светиться под действием ударов альфа-частиц.

А что нужно измерять в опыте? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно провести «установочный эксперимент»: увидеть, как изменится картина сцинтилляций на экране, установленном напротив щели, если на пути потока альфа-частиц поместить металлическую фольгу.

Итак, если направить поток альфа-частиц на экран, то сцинтилляции происходят в ограниченной области экрана, преимущественно напротив щели. Если же на пути потока альфа-частиц поместить фольгу, то область экрана, в которой происходят сцинтилляции, существенно увеличи-





I состояние:

$$W_{\text{к},1} = \frac{m_\alpha v^2}{2}; \qquad W_{\text{п},1} = 0;$$

$$W_1 = W_{\text{к},1} + W_{\text{п},1} = \frac{m_\alpha v^2}{2}.$$

II состояние:

$$W_{\text{к},2} = 0; \qquad W_{\text{п},2} = k \cdot \frac{q_+ \cdot q_\alpha}{R_+};$$

$$W_2 = W_{\text{к},2} + W_{\text{п},2} = k \cdot \frac{q_+ \cdot q_\alpha}{R_+}.$$

1-ое предположение: допустим, что атом золота имеет радиус $R = 0{,}14 \cdot 10^{-9}$м

$$W_1 = \frac{m_\alpha v^2}{2}; \qquad W_2 = k \cdot \frac{q_+ \cdot q_\alpha}{R};$$

По закону сохранения энергии:

$$W_1 = W_2;$$

$$\frac{m_\alpha v^2}{2} = k \cdot \frac{q_+ \cdot q_\alpha}{R};$$

$$q_+ = \frac{m_\alpha v^2 R}{2 k q_\alpha};$$

$$[q_+] = \left[\frac{m_\alpha v^2 R}{2 k q_\alpha}\right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}} = \text{Кл}.$$

$$q_+ = \frac{6{,}64 \cdot 10^{-27} \cdot 225 \cdot 10^{12} \cdot 0{,}14 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{9} \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-19}} =$$

$$= 3{,}6 \cdot 10^{-14} (\text{Кл}),$$

вается. Это свидетельствует о том, что многие альфа-частицы, проходя экран, изменяют направление своей скорости — рассеиваются.

Значит, в данном опыте можно подсчитать число альфа-частиц, которые испытывают рассеяние на определенный угол по отношению к первоначальному (известному) направлению: $N(\vartheta)$.

Опыт позволил установить такие закономерности. Первая: значительная часть альфа-частиц прошла через фольгу, не изменяя своего направления движения. Это означает, что они не испытали на себе действие поля положительной части атома.

Вторая: число частиц, испытавших рассеяние, тем больше, чем меньше угол рассеяния (ϑ).

Третья: среди частиц, испытавших рассеяние есть такие, которые изменили направление движения практически на противоположное. Такие случаи происходят крайне редко: примерно одна из 2000 частиц отклоняется на угол, больший 90^0.

Предвидеть такие результаты на основании модели Томсона было невозможно. Мы приводим для убедительности расчет значения положительного заряда атома, который смог бы остановить альфа-частицу на расстоянии, равном размеру атома. Полученный результат абсурден, ведь получается, что положительный заряд атома в 200 000 раз больше заряда электрона! Такой атом должен был бы содержать столько же электронов. Но тогда масса всех этих электронов примерно в сто раз больше массы атома водорода.

Остается допустить, что положительный заряд атома сосредоточен в значительно меньшей области пространства. Мы приводим расчет размеров ядра атома золота, полагая, что заряд его равен порядковому номеру этого химического элемента в периодической системе, умноженному на значение заряда электрона.

Обратите внимание: оказывается, что в таком случае положительно заряженная часть атома, во-первых, занимает область размерами порядка $10^{-12} \div 10^{-13}$ см, а во-вторых, на ее долю приходится практически вся масса атома.

К такому же результату привела математическая обработка и интерпретация результатов рассеяния альфа-частиц в опытах Резерфорда.

Таким образом, опыты Резерфорда

$$\left|\frac{q_+}{q_e}\right| = \frac{3{,}6\cdot10^{-14}}{1{,}6\cdot10^{-19}} \approx 2{,}2\cdot10^5.$$

Тогда в состав такого атома входит примерно $N = 2{,}2\cdot10^5$ электронов и их суммарная масса составит:

$$Nm_e = 2{,}2\cdot10^5\cdot9{,}1\cdot10^{-31}\ \text{кг} = 2\cdot10^{-25}\ \text{кг};$$

это составит примерно $\dfrac{2\cdot10^{-25}\ \text{кг}}{196\cdot1{,}7\cdot10^{-27}\ \text{кг}} = 0{,}6$ массы атома золота.

2-ое предположение: допустим заряд положительно заряженной части атома равен 79$|q_e|$

$$W_1 = \frac{m_\alpha v^2}{2}; \qquad W_2 = k\cdot\frac{q_+\cdot q_\alpha}{R};$$

По закону сохранения энергии:

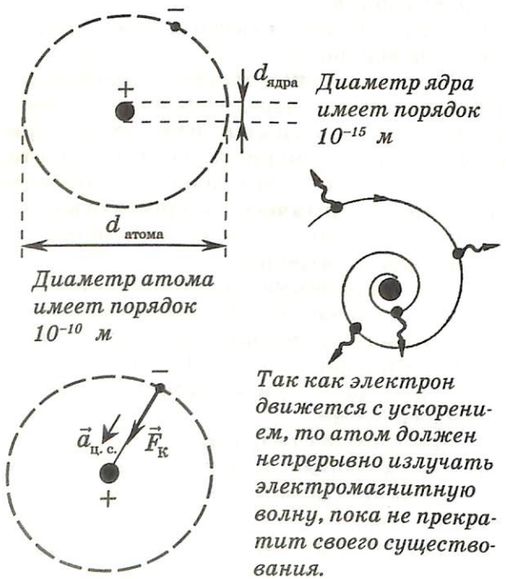
$$W_1 = W_2;$$

$$\frac{m_\alpha v^2}{2} = k\cdot\frac{q_+\cdot q_\alpha}{R};$$

$$R = \frac{2kq_\alpha q_+}{m_\alpha v^2};$$

$$[R] = \left[\frac{2kq_\alpha q_+}{m_\alpha v^2}\right] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Кл}\cdot\text{Кл}\cdot\text{с}^2}{\text{кг}\cdot\text{Кл}^2\cdot\text{м}^2\cdot} = \text{м}.$$

$$R = \frac{2\cdot9\cdot10^9\cdot3{,}2\cdot10^{-19}\cdot79\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}{6{,}64\cdot10^{-27}\cdot225\cdot10^{12}} = 5\cdot10^{-14}(\text{м}).$$



Диаметр ядра имеет порядок 10^{-15} м

Диаметр атома имеет порядок 10^{-10} м

Так как электрон движется с ускорением, то атом должен непрерывно излучать электромагнитную волну, пока не прекратит своего существования.

выявили несостоятельность модели Томсона и привели к созданию новой модели — планетарной модели атома Резерфорда.

Согласно этой модели в центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома. Вокруг ядра движутся электроны. Число электронов таково, что суммарный электрический заряд атома равен нулю. (В специальных опытах было установлено, что число электронов в атоме равно порядковому номеру данного химического элемента в периодической системе.)

Электроны не могут покоиться в атоме, так как в этом случае силы притяжения к ядру привели бы к «падению» электронов на ядро. Следовательно, они движутся вокруг ядра подобно планетам вокруг Солнца. (Обратите внимание: силы тяготения между тяготеющими телами обратно пропорциональны квадрату расстояния. И Кулоновские силы, действующие между ядром и электроном, также обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. То есть такой характер движения электрона в атоме может определяться действием именно кулоновских сил.)

Самое «маленькое» ядро — ядро атома водорода, получило название **«протон»**. Вокруг него движется всего один электрон.

Предложив новую модель атома, нужно проверить, как она объясняет известные закономерности. И снова мы можем констатировать: эта модель объясняет нейтральность атома в «обычном» состоянии, явления электризации и ионизации. Размеры атомов, как следует из модели, должны увеличиваться с ростом числа электронов в них, и определяются радиусом орбиты, по которой движутся самые удаленные от ядра электроны.

Однако, согласно классической электродинамике такой атом оказывается чрезвычайно неустойчивым.

Ведь электрон (заряженная частица) движется по окружности (то есть с ускорением) и, следовательно, должен непрерывно терять энергию в виде электромагнитного излучения и примерно через 10^{-8} с должен упасть на ядро! Но этого в действительности не наблюдается: атом практически вечен...

Следовательно, мы столкнулись с противоречием. С одной стороны, модель атома Резерфорда имеет прямое экспериментальное обоснование. С другой — она не

Модель атома Резерфорда

может объяснить:
опытные факты №2, 3, 4, 5, 6, 9, 10;

не может объяснить:
опытные факты № 1, 7, 8.

Так как модель атома Резерфорда имеет прямое экспериментальное обоснование, то правомерно высказать новые предположения:
1. Она дает «правильную» картину строения атома;
*2. Невозможность объяснения фактов № 1, 7 и 8 при помощи этой модели связаны с тем, что законы классической механики и классической электродинамики, полученные для макроскопических объектов, **нельзя применять** к объектам микроскопическим, какими являются атомы.*

может объяснить самый фундаментальный факт — устойчивость атомов. Разрешение этого противоречия потребовало от ученых большой изобретательности и смелости.

Аналогичные ситуации, как вы помните, уже возникали в физике: классическая механика оказалась не в состоянии объяснить движение объектов с большими скоростями.

Классическая электродинамика не могла объяснить излучение абсолютно черного тела.

В сознании человека трудно укладываются представления о дуализме волна-частица...

Но метод научного познания дает четкие ориентиры исследователю:нужно четко сформулировать новый вопрос. Можно ли применять законы классической физики, установленные для макроскопических тел, для описания микроскопических объектов, какими являются атомы?

Отрицательный ответ на него, требует построения новой гипотезы, новых опытов, и... построения новой физической теории.

§ 2. ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА – БОРА

Н. Бор
1885 — 1962

Принцип соответствия:

каждая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание явлений природы и более широкие границы применимости, чем старая, должна включать последнюю в себя как предельный случай.

Выход из ситуации, которая сложилась после того, как Резерфорд в 1911 году провел свои знаменитые опыты по рассеянию альфа-частиц и предложил планетарную модель атома, был найден датским физиком Н. Бором.

Мы уже упоминали имя этого ученого в связи с обсуждением принципа соответствия. Как вы помните, этот принцип говорит о том, что каждая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание явлений природы и более широкие границы применимости, чем старая, должна включать в себя последнюю как предельный случай.

Закладывая фундамент новой физической теории — квантовой механики, Н. Бор сформулировал в виде постулатов основные положения этой теории, развивая квантовые представления о процессах в природе. Эти постулаты не отвергали законы классической физики, но накладывали некоторые ограничения на допускаемые классической физикой движения.

Первый постулат Бора накладывал ограничения на значения энергии, которые может принимать атом, как система взаи-

I постулат Бора

Атомная система может находиться только в особых, стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия W_n.

В стационарном состоянии атом не излучает.

***Классическая механика:** любое тело или система тел может принимать любые значения энергии. Поэтому при переходе из одного механического состояния в другое изменение энергии может быть сколь угодно малым.*

***Классическая электродинамика:** заряженное тело, движущееся с ускорением, непрерывно излучает электромагнитные волны и, следовательно, теряет энергию. Поэтому движение тела быстро прекращается, если его энергия не пополняется из какого-либо источника.*

II постулат Бора

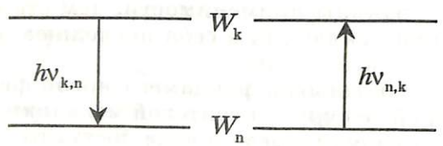
Излучение или поглощение света происходит квантами при переходе атома из одного стационарного состояния в другое.

Энергия излученного (или поглощенного) фотона равна изменению энергии этих стационарных состояний:

$$h\nu_{k,n} = |W_n - W_k|;$$

$$\nu_{k,n} = \frac{|W_n - W_k|}{h}.$$

В атоме (квантовой системе):



$$\nu_{k,n} = \frac{|W_n - W_k|}{h}. \qquad \nu_{n,k} = \frac{|W_k - W_n|}{h}.$$

Частота излучения не зависит от характера движения (в частности, ускорения) электрона, а целиком определяется изменением энергии при переходе из одного состояния в другое.

модействующих тел (ядра и электронов). Это, в свою очередь, означало, что атом может находиться только в определенных состояниях. Их Н. Бор назвал **стационарными**, чтобы подчеркнуть, что находясь в таком состоянии, атом не излучает электромагнитных волн, его энергия остается постоянной.

Этот постулат, конечно, противоречит и классической механике, и классической электродинамике. Первой — потому, что классическая система может находиться в любых состояниях. Энергия системы при этом может плавно меняться со сколь угодно малым шагом, непрерывно.

Противоречие с классической электродинамикой мы уже называли: в любом состоянии электрон движется внутри атома по криволинейной траектории (если к нему вообще применимо понятие траектории!), то есть ускоренно. А заряд, движущийся с ускорением, непрерывно излучает электромагнитную волну.

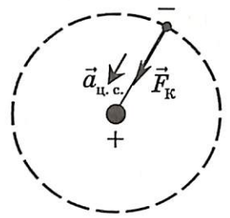
Второй постулат описывает излучение и поглощение света атомом. Конечно, при переходе из одного состояния в другое, энергия системы меняется (она может увеличиваться или уменьшаться, в зависимости от рода процесса). И в этом ничего противоречащего классической механике нет. Но в классической механике изменение энергии системы обязательно сопровождается совершением работы или процессами теплопередачи.

А в данном случае, в процессе изменения состояния системы рождается и излучается или целиком поглощается квант света. При этом закон сохранения энергии выполняется точно, так что квант «уносит» или «приносит» с собой энергию, равную изменению энергии системы при переходе из одного состояния в другое.

Поскольку энергия кванта прямо пропорциональная его частоте, то второй постулат Бора определяет значение частоты света, который излучается или поглощается атомом при переходе из одного состояния в другое.

Этот постулат Бора противоречит классической электродинамике, так как частота излучения в теории Бора не зависит от особенностей движения электрона, а целиком определяется лишь изменением энергии.

Эти постулаты имеют общий качественный характер, так как не относятся к



1. В системе отсчета, связанной с ядром:

$$W = W_к + W_п;$$

$$W_к = \frac{m_e \upsilon^2}{2}, \text{ где}$$

m_e – масса электрона;

υ – скорость движения электрона по орбите.

$$W_п = -k\frac{|q_e|\cdot|q_я|}{r} = -k\frac{e^2}{r}, \text{ где}$$

$|q_e| = e$ – модуль заряда электрона;

$|q_я| = e$ – модуль заряда ядра водорода;

r – радиус орбиты электрона;

$k = 9\cdot10^9 \frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$ – постоянная электрического взаимодействия.

$$W = \frac{m_e\upsilon^2}{2} + \left(-k\frac{e^2}{r}\right) = \frac{m_e\upsilon^2}{2} - k\frac{e^2}{r}.$$

2. Применим уравнение II закона Ньютона и установим связь между скоростью движения и радиусом орбиты.

$$\vec{F} = m_e\vec{a}_{ц.с.};$$

для модулей: $F = m_e a_{ц.с.}$;

$F = k\frac{e^2}{r^2}$ – по закону Кулона;

$a_{ц.с.} = \frac{\upsilon^2}{r}$;

$$k\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e\upsilon^2}{r};$$

$$k\frac{e^2}{r} = m_e\upsilon^2;$$

Тогда для значения полной энергии получим:

$$W = k\frac{e^2}{2r} - k\frac{e^2}{r} = -k\frac{e^2}{2r}.$$

какому-то одному сорту атомов. Количественные расчеты были выполнены Бором для простейшего атома — атома водорода. Воспроизведем эти расчеты и мы.

Главная задача в построении количественной теории атома водорода состоит в том, чтобы, исходя из модели и сформулированных постулатов, теоретическим путем рассчитать частоту квантов света (или частоту линий в спектре атома водорода), которые может излучать и поглощать атом водорода.

А для этого нужно уметь рассчитать энергию стационарных состояний, в которых может находиться атом водорода. Если бы атом был классической системой, то подсчитать его энергию было бы нетрудно.

Вспомните, как мы рассчитывали энергию системы тел в классической механике (например, тела движущегося под действием силы тяжести).

Сначала мы выбирали систему, относительно которой проводили расчеты (нулевой уровень для отсчета потенциальной энергии взаимодействия и ИСО для определения значения скорости, и следовательно, кинетической энергии). Применим этот способ и здесь. Будем рассматривать движение электрона в системе отсчета, связанной с ядром атома, а потенциальную энергию взаимодействия электрона с ядром будем отсчитывать «от бесконечности». Фактически это означает, что электрон, который «оторвался» от ядра, с ним не взаимодействует, и тогда потенциальная энергия этой системы равна нулю.

Будем считать, что формулы для расчета кинетической и потенциальной энергии можно применить (в первом приближении) к движению электрона. Тогда полная энергия системы «ядро-электрон» (а попросту — энергия атома) будет равна сумме кинетической и потенциальной энергии электрона.

Поскольку в нашей модели электрон движется по окружности, то можно воспользоваться связью между скоростью и центростремительным ускорением.

Тогда вид формулы для полной энергии атома упрощается: энергия прямо пропорциональна квадрату заряда электрона и обратно пропорциональна радиусу орбиты электрона. Знак «минус» показывает, что данная система «связанная»: устойчивому равновесию в механике соотвествует состояние с минимумом потенциальной энергии.

3. Рассмотрим размерность постоянной Планка:

$$[h] = \text{Дж}\cdot\text{с} = \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}\cdot\text{м}\cdot\text{с} = \text{кг}\cdot\frac{\text{м}}{\text{с}}\cdot\text{м}.$$

4. Рассмотрим величину: $m_e v r$ – момент импульса

$$[m_e v r] = \text{кг}\cdot\frac{\text{м}}{\text{с}}\cdot\text{м};$$

5. Правила квантования:

$$m_e v r = \frac{h}{2\pi}\cdot n = \hbar n, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \ldots,$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

6. Упрощая выражение $m_e v^2 = k\dfrac{e^2}{r}$ и применяя правила квантования, получим:

$$m_e v^2 r = ke^2; \qquad (m_e v r)^2 = ke^2 m_e r;$$

$$(\hbar\cdot n)^2 = ke^2 m_e r;$$

$$r_n = \frac{(\hbar\cdot n)^2}{ke^2 m_e} = \frac{\hbar^2 n^2}{ke^2 m_e}.$$

7. Тогда разрешенные значения энергии таковы:

$$W_n = -k\frac{e^2}{2r_n} = -k\frac{e^2}{2\dfrac{\hbar^2 n^2}{ke^2 m_e}} = -k\frac{ke^2 m_e e^2}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2 n^2}$$

$$W_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}.$$

8. Для $n = 1$

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{ke^2 m_e}; \qquad W_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}$$

$$r_1 = \frac{\left(1{,}05\cdot10^{-34}\right)^2}{9\cdot10^9\cdot\left(1{,}6\cdot10^{-19}\right)^2\cdot9{,}1\cdot10^{-31}} =$$

$$= \frac{1{,}05^2}{9\cdot1{,}6^2\cdot9{,}1}\cdot10^{-68-9+38+31} = 0{,}005\cdot10^{-8}\,(\text{м});$$

$$r_1 = 0{,}5\cdot10^{-10}\,\text{м}.$$

$$W_1 = -\frac{\left(9\cdot10^9\right)^2\cdot9{,}1\cdot10^{-31}\cdot\left(1{,}6\cdot10^{-19}\right)^4}{2\cdot\left(1{,}05\cdot10^{-34}\right)^2} =$$

$$= -\frac{9^2\cdot9{,}1\cdot1{,}6^4}{2\cdot1{,}05^2}\cdot10^{18-31-76+68} = -2{,}2\cdot10^3\cdot10^{-21} =$$

$$= -2{,}2\cdot10^{-18}\,(\text{Дж}) = -\frac{2{,}2\cdot10^{-18}}{1{,}6\cdot10^{-19}}\ \text{эВ} = -13{,}6\ \text{эВ}.$$

По классической механике расстояние между взаимодействующими телами может быть любым («принимает непрерывный ряд значений»). И энергия тоже принимает непрерывный ряд значений. А по теории Бора — только некоторые, «разрешенные» значения энергии, а значит и расстояний между ядром и электроном. Как же их выбрать?

Н. Бор предложил воспользоваться для этого **«правилами отбора»** или **правилами квантования.** Он обратил внимание на то, что постоянная Планка (а она фигурирует в формулах для расчета частоты излучения атомом) имеет такую же размерность, что и момент импульса. Момент импульса, в свою очередь, равен произведению массы электрона на его скорость и радиус окружности, по которой он движется. А это значит, что и момент импульса электрона в атоме может принимать только вполне определенные «квантованные» значения. Бор предположил, что минимальный момент может быть равным постоянной Планка, деленной на 2π, а все остальные значения — кратны этой постоянной, то есть равны произведению постоянной Планка, деленной на 2π, на последовательные целые числа $n = 1, 2, 3, \ldots$.

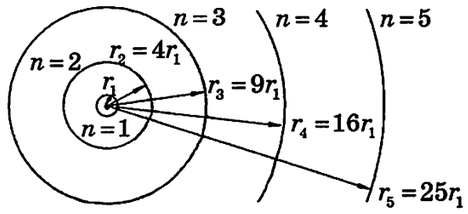
Применяя это правило, получим выражение для разрешенных радиусов орбит, а затем и разрешенных значений энергии для атома водорода.

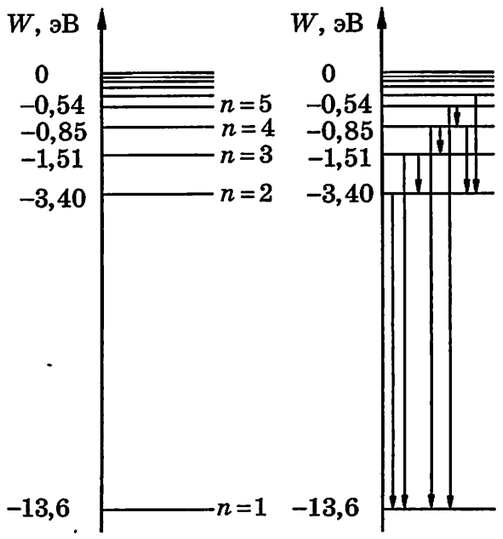
Сразу обратите внимание, какие красивые формулы нами получены! Не случайно А. Эйнштейн оценивал эту работу Н. Бора «как высшую музыкальность в области мысли». В эту формулу вошли только универсальные (!) физические постоянные: постоянная Планка, заряд и масса электрона, а также квадрат натурального числа.

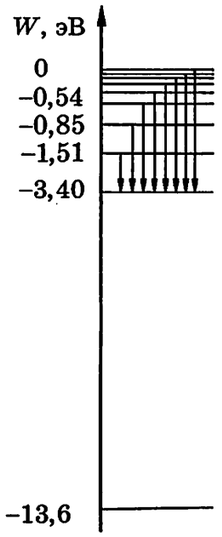
Это означает, что радиус боровских орбит меняется дискретно с изменением числа n. Для $n = 1$ получим состояние с минимальным радиусом орбиты и минимальным значением энергии. Подсчитаем их.

Посмотрите на эти значения и запомните их: минимальный радиус совпадает в пределах погрешности по своему значению с радиусом атома водорода, полученным в многочисленных опытах. А значение энергии численно равно энергии ионизации атома водорода, которое хорошо известно всем химикам и физикам, занимающимся атомной физикой. Этот результат по праву можно считать триумфом теории Бора!

§ 3. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА АТОМАМИ. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ







Серия Бальмера (видимый свет) образуется при переходах атома в состояние, соответствующее $n = 2$ (первое возбужденное состояние):

$$h\nu_{2n} = |W_2 - W_n|,$$

$$n = 3,\ 4,\ 5,\ \ldots;$$

$$\nu_{2n} = \frac{|W_2 - W_n|}{h};$$

$$\nu_{2n} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right);$$

Полученные нами в предыдущем параграфе формулы позволяют рассчитать радиусы орбит электрона в атоме водорода и соответствующие этим радиусам значения энергии, которой обладает атом водорода в этих состояниях.

Нетрудно заметить, что радиусы орбит в разрешенных состояниях увеличиваются пропорционально квадрату целого числа n, а значения энергии — обратно пропорционально квадрату этого числа.

На рисунках изображены разрешенные орбиты электрона в атоме водорода и **схема энергетических уровней** этого атома.

Состояние атома, соответствующее числу $n = 1$, называется **основным состоянием** атома: в нем обычно и находится атом. Это состояние устойчивого равновесия. Все остальные состояния называются **возбужденными.** В них атом может находиться сравнительно недолго: **самопроизвольно** испуская квант света, он переходит в нижележащее состояние.

Для всех возбужденных состояний, кроме $n = 2$, существует несколько способов перехода атома в основное состояние. Каждому из этих переходов соответствует свое изменение энергии и, значит, соответствующее этому переходу значение частоты светового кванта.

На рисунке показаны группы переходов (не все!) в основное состояние, первое возбужденное и второе возбужденное состояния. Нетрудно догадаться, что список аналогичных переходов можно было бы продолжить. Для чего мы приводим такие переходы? Они образуют **серии спектральных линий.** Частоты, соответствующие переходам таких серий линий, легко можно найти и рассчитать по приведенным формулам.

Одну из этих формул вы, наверняка, узнали: это формула Бальмера, найденная им эмпирически. В эту серию входят линии видимой части спектра, они соответствуют переходу атомов из всевозможных возбужденных состояний в первое возбужденное состояние (ему соответствует число $n = 2$).

Таким образом, полученная Бором формула для энергетических уровней атома водорода позволила теоретически предсказать значения частот линий в спектре

Серия Лаймана (ультрафиолетовая) образуется при переходах атома в основное состояние, соответствующее $n = 1$

$$h\nu_{1n} = |W_1 - W_n|, \quad n = 2, 3, 4, 5, \ldots;$$

$$\nu_{1n} = \frac{|W_1 - W_n|}{h};$$

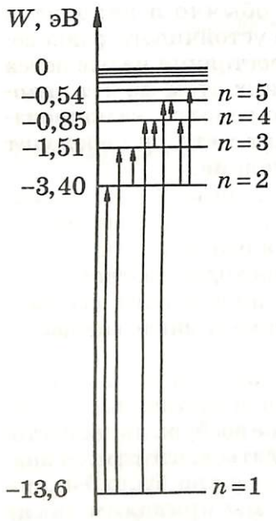
$$\nu_{2n} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right);$$

Серия Пашена (инфракрасная) образуется при переходах атома в состояние, соответствующее $n = 3$ (второе возбужденное состояние)

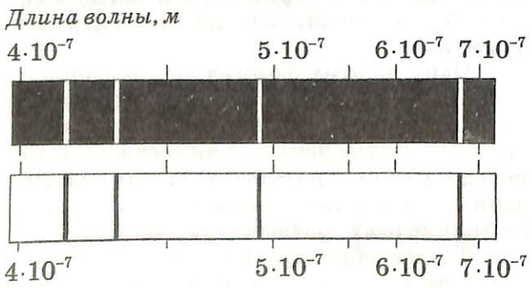
$$h\nu_{3n} = |W_2 - W_n|, \quad n = 4, 5, \ldots;$$

$$\nu_{3n} = \frac{|W_3 - W_n|}{h};$$

$$\nu_{3n} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right);$$



Спектр испускания водорода (видимая часть спектра)



Спектр поглощения водорода (видимая часть спектра)

атома водорода. Эти предсказанные значения частот полностью совпали с измеренными значениями.

Эта теория полностью объяснила спектральные закономерности, которые были обнаружены учеными при изучении спектра атома водорода. Таким образом, теория Бора получила еще одно экспериментальное подтверждение.

Теперь нетрудно понять, почему атомы излучают свет строго определенных частот и их **спектры испускания** (или спектры излучения) **линейчатые**, и у каждого сорта атомов — свои, индивидуальные. Это связано с особенностями строения атома и наличием вполне определенной системы разрешенных состояний (энергетических уровней) у каждого сорта атомов.

Атомы испускают свет, когда переходят из одного возбужденного состояния в другое, с меньшей энергией, или в основное состояние. Этот переход происходит **самопроизвольно.**

А поскольку во всех возбужденных состояниях энергия атома больше, чем в основном, то самопроизвольно перейти в эти состояния атом не может. Для этого ему необходимо сообщить дополнительную энергию, то есть необходимо **возбудить** атом.

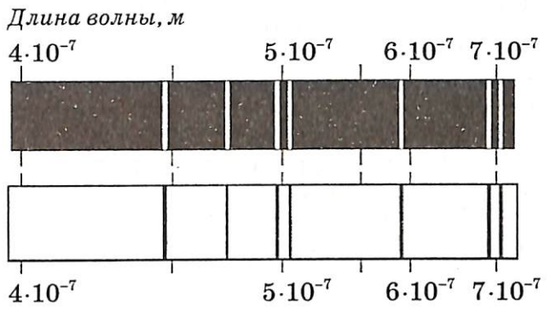
Мы уже называли разные способы возбуждения атомов, когда рассматривали вопрос об источниках света. Можно, например, нагреть газ так, чтобы при столкновениях кинетическая энергия теплового движения превращалась во «внутреннюю» энергию атома. Аналогичную роль могут сыграть электроны, разогнанные в электрическом поле до больших скоростей. Но возбудить атомы можно и светом.

Действительно, если рассматривать свет как поток фотонов разных частот, то при взаимодействии с атомом фотон, обладающий энергией, достаточной, чтобы перевести атом в возбужденное состояние, поглощается атомом. Поскольку у атома много возбужденных состояний, то поглощаться из светового потока будут фотоны тех частот, энергия которых равна изменению энергии атома при всевозможных переходах между этими состояниями.

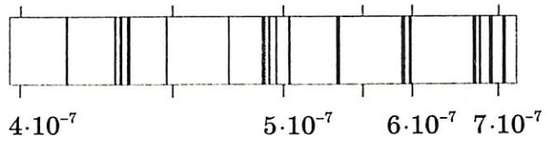
Это означает, что из всего сплошного спектра (то есть спектра, в котором присутствует непрерывный ряд частот) атомы поглотят излучения «своих» частот.

В результате в сплошном спектре будут отсутствовать линии (то есть на их месте будут наблюдаться черные промежутки), находящиеся точно в тех же местах, где они раньше находились в спектре испускания.

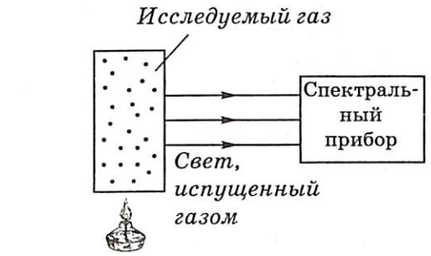
Спектры испускания и поглощения гелия (видимая часть спектра)

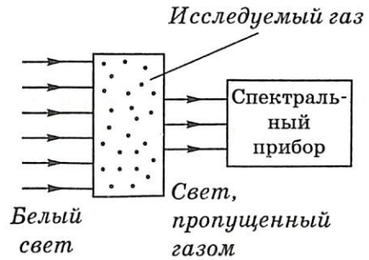


Спектр поглощения атмосферы Солнца (видимая часть спектра)



***Спектральный анализ** — метод определения химического состава вещества по его спектру. Чувствительность метода составляет 10^{-10} г!*





Призменный спектроскоп

Главное свойство линейчатых спектров состоит в том, что они не зависят от способа возбуждения атомов, а определяется только сортом атомов, которые этот свет излучают или поглощают.

На этом основан один из самых тонких и чувствительных физических методов обнаружения и идентификации химических элементов — **спектральный анализ.**

Интересно, что основы спектрального анализа были разработаны немецкими учеными Бунзеном и Кирхгофом еще в 1859 году, когда вопрос о сложном строении атома еще не обсуждался!

В этом методе исследуется свет, испускаемый тем или иным веществом. При этом неважно, в каком состоянии — жидком, твердом или газообразном, находится изучаемый объект. Неважно — находится он в лаборатории, в непосредственной близости от исследователя, или на огромных расстояниях от него. Важно, чтобы этот объект испускал свет.

На рисунках показаны примерные блок-схемы получения спектра испускания и спектра поглощения света атомами. В качестве спектрального прибора используются спектроскопы или спектрографы. (Оптическая схема такого прибора приведена на рисунке и вы легко разберетесь в ней сами. В качестве устройства, которое разлагает свет в спектр обычно используются призмы из специальных сортов стекла или дифракционные решетки.)

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены специальные таблицы спектров. С ними и сравнивают исследуемые спектры. Ученые измеряют в исследуемом спектре частоту линий, а затем в таблице линий находят названия атомов, в спектре которых имеются линии таких же частот.

В таком случае спектральный анализ позволяет определить, какие атомы испускали исследуемый свет — это **качественный спектральный анализ.**

С помощью качественного спектрального анализа были открыты новые химические элементы. Многим из них даже да-

Применение спектрального анализа:

1. Определение химического состава звезд, газовых облаков и т. п.;

2. Определение химического состава руд и минералов в геологии;

3. Контроль состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии, криминологии;

4. Определение температуры различных объектов (от звезд до расплавленного металла);

5. Определение давления внутри звезд;

6. Определение скорости движения космических тел (звезд, планетных систем, галактик);

7. Обнаружение магнитных полей у космических тел и определение значения их магнитной индукции.

вали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий спектра: рубидий (темнокрасные, рубиновые линии), цезий (небесно-голубой) и др.

Именно с помощью спектрального анализа (другие методы анализа здесь вообще невозможны) удалось установить химический состав Солнца и звезд. В спектре поглощения Солнца впервые был открыт гелий, в переводе «солнечный».

В настоящее время ученые составили таблицы линий излучения многих молекул. Такие спектры состоят из отдельных полос, каждая из которых представляет собой совокупность большого числа тесно расположенных линий. Их называют **полосатыми** спектрами. При получении таких спектров важно, чтобы молекулы излучали свет, но не распадались на отдельные атомы.

По спектру можно также определить, каких атомов в веществе, излучающем свет, больше (в процентном отношении). Такой спектральный анализ называется **количественным**.

В этом случае сравнивается интенсивность (яркость) линий спектра. Чем больше атомов данного сорта находится в исследуемом веществе, тем более яркими будут линии его спектра.

Количественный спектральный анализ позволяет также определять температуру, давление, скорость движения излучающего свет объекта и даже магнитную индукцию его поля.

§ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ

Для возбуждения атомов можно воспользоваться излучением разного вида.

Теория атома водорода, построенная Бором, сумела объяснить процессы испускания и поглощения света атомами и все спектральные закономерности. Однако, эти успехи были получены ценой отказа от фундаментальных положений классической механики и электродинамики. Поэтому так важно было получить прямые экспериментальные подтверждения существования стационарных состояний у атомов.

Такие опыты были поставлены в 1913 году немецкими физиками Джеймсом Франком и Густавом Герцем.

Идея этих опытов такова. Нужно исследовать поведение атомов при передаче им энергии. Если у атомов имеются стационарные состояния, то атом сможет поглощать строго определенные количества энергии и тогда переходить в возбужденные состояния. Если же таких состояний нет, то атом может увеличивать свою «внутреннюю» энергию и переходить в возбужденные состояния непрерывно.

Передавать энергию атому можно разными способами. Мы уже говорили о тепловом и люминесцентном излучении. Какое выбрать?

Поскольку в данном случае речь идет о постановке количественного эксперимента, то важно уметь определять числовое значение энергии, поглощаемое атомами в каждом случае. Тепловой способ возбуждения атомов в этом случае не пригоден. В своих опытах в качестве частиц, передающих атому энергию, Франк и Герц использовали электроны.

Для получения свободных электронов они воспользовались явлением **термоэлектронной эмиссии**. Оно состоит в том, что при нагревании с поверхности металлов (а в них имеется много электронов), начиная с определенной температуры, происходит интенсивное «испарение» электронов.

Изменить кинетическую энергию этих вылетевших за пределы металла электронов нетрудно при помощи электрического поля. Если при этом известна ускоряющая разность потенциалов, то можно рассчитать кинетическую энергию электронов.

Остается направить этот поток электронов на атомы, у которых мы хотим обнаружить (если они существуют!) стационарные состояния.

Рассмотрим качественно характер взаимодействия электрона с атомом. Вам известно, что атом имеет массу, значительно превышающую массу электрона. Поэтому в большинстве случаев следует ожидать упругого столкновения электрона с атомом. В этом случае, после «отскока» от атома электрон имеет практически прежнее значение скорости. (Так теннисный мяч упруго отскакивает от массивной стенки: изменяется только направление скорости мяча, а значение скорости практически не меняется.)

Если же при определенном значении энергии электрона между ним и атомом происходит неупругое столкновение (такое возможно, когда у атома есть стационарное состояние, переход в которое происходит при сообщении атому именно такого значе-

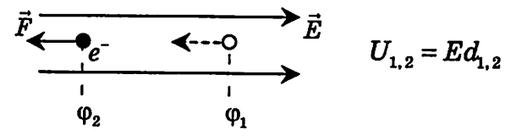
Термоэлектронная эмиссия:

1. Явление «испарения» электронов с поверхности металлов при их нагревании;

2. Условие, при котором явление происходит наиболее интенсивно

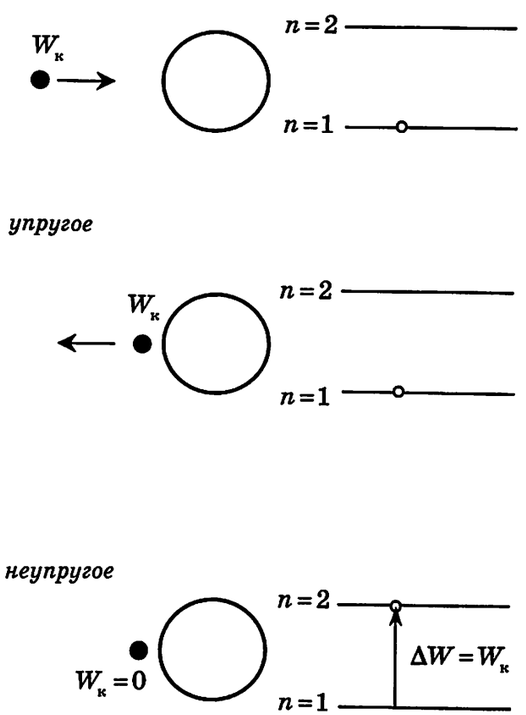
$$W_к \geq A_{вых};$$
$$A_{вых} = \text{const};$$
$$W_к \uparrow, \text{ если } T \uparrow.$$

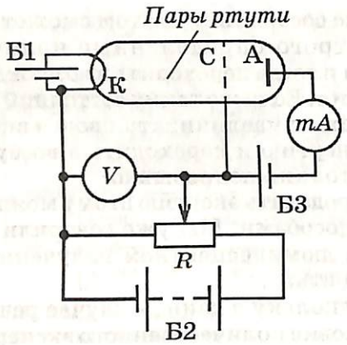
Изменяя напряженность электрического поля, можно плавно менять энергию электрона:

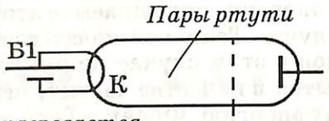


$$U_{1,2} = Ed_{1,2}$$

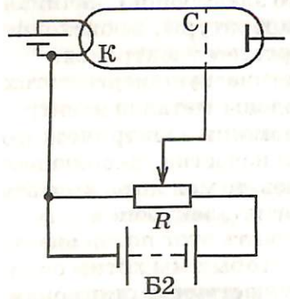
$$W_к = e(\varphi_1 - \varphi_2);$$
$$W_к = eU_{1,2}$$



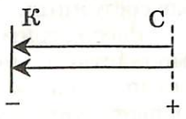




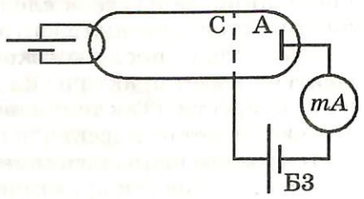
Катод нагревается током, создаваемым в нем батареей Б1. В трубке появляются термоэлектроны.



При помощи батареи Б2 создается напряжение между катодом К и сеткой С. Потенциометр R позволяет плавно менять напряжение между катодом и сеткой.

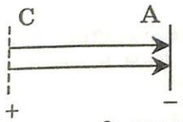


Поле между катодом и сеткой ускоряет термоэлектроны.



Батарея Б3 создает между сеткой С и анодом А поле, тормозящее электроны.

Миллиамперметр измеряет силу тока, текущего между сеткой и анодом



Поле между сеткой и анодом тормозит электроны

ния энергии), то в результате столкновения кинетическая энергия электрона окажется практически равной нулю.

Следовательно, нам нужно создать такую установку, в которой можно «отличить» друг от друга электроны с большой и малой кинетической энергией. Это можно сделать, если дать возможность электронам после столкновения двигаться в «тормозящем» поле: быстро движущиеся электроны смогут его преодолеть, а движущиеся медленно или даже покоящиеся — нет.

Движущиеся электроны создают ток, силу тока мы умеем измерять. Следовательно, остается реализовать описанные идеи в схеме экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки Франка – Герца приведена на рисунке. Разберем ее по частям, тогда вам будет проще понять, как в ней реализованы описанные выше идеи.

Из стеклянного сосуда откачивали воздух, а затем заполняли его парами ртути. Именно с атомами ртути и происходили в дальнейшем столкновения электронов.

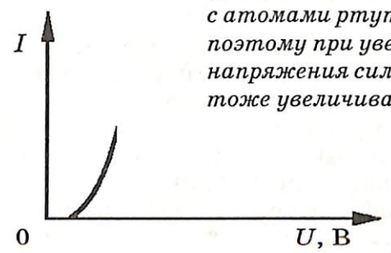
Внутри сосуда находился катод — металлический электрод, который нагревался до нужной температуры током, создаваемым в цепи катода источником тока Б1. Таким образом подогреваемый катод являлся источником термоэлектронов.

Если подобрать температуру катода так, чтобы кинетическая энергия вылетевших электронов была практически равна нулю, то приобрести кинетическую энергию электроны могут в электрическом поле, созданном с помощью электрода С. Он изготовлен в виде сетки, чтобы разогнавшиеся электроны могли оказаться за сеткой, в области СА. Электрическое поле в пространстве КС создается источником тока Б2. При помощи потенциометра напряжение между катодом и сеткой можно плавно менять от нуля до значения, близкого к ЭДС батареи Б2.

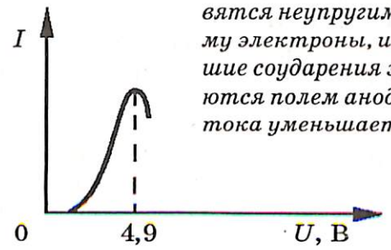
Сначала интересующие нас столкновения электронов с атомами ртути происходят в области между сеткой и анодом.

Чтобы в этой области создать постоянное тормозящее поле, используется третий электрод — анод, и еще один источник тока Б3. Миллиамперметр в цепи анода измеряет силу тока, текущую в промежутке СА.

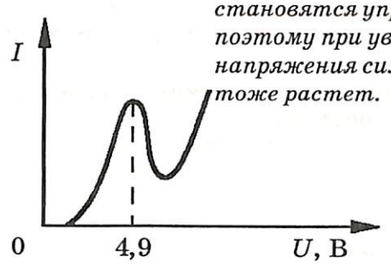
При проведении опыта измеряли силу тока в зависимости от напряжения между катодом и сеткой. График полученной экспериментальной зависимости представлен на рисунке. Поясним его ход (или интерпретируем графическую зависимость).



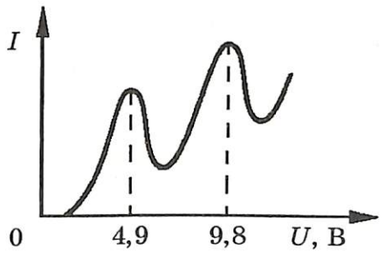
Столкновения электронов с атомами ртути упругие, поэтому при увеличении напряжения сила тока тоже увеличивается.



Столкновения электронов с атомами ртути становятся неупругими, поэтому электроны, испытавшие соударения задерживаются полем анода, и сила тока уменьшается.



Столкновения электронов с атомами ртути снова становятся упругими, поэтому при увеличении напряжения сила тока тоже растет.



При напряжении, равном 9,8 В электрон приобретает сначала энергию 4,9 эВ, возбуждает один атом ртути, теряет энергию, но снова успевает набрать энергию 4,9 эВ и возбудить еще один атом ртути. Сила тока при таком значении напряжения имеет выраженный максимум.

Сначала при повышении напряжения сила тока в цепи анода увеличивалась. Это связано с тем, что число электронов, проходящих за 1 с расстояние от катода до анода увеличивается, если увеличиваетсясредняя скорость движения электронов.

При значении напряжения, равном 4,9 В наблюдается резкое уменьшение силы тока. Это означает, что в промежутке СА число электронов, способных преодолеть тормозящее поле, резко уменьшилось. Следовательно, этот факт можно объяснить, если допустить, что электроны, пройдя ускоряющее напряжение равное 4,9 В и приобретая энергию в 4,9 эВ, испытывают неупругие столкновения с атомами ртути и отдают им свою энергию.

Так как столкновения испытывают не все электроны, то некоторая их часть доходит до анода и сила тока не падает до нуля.

При дальнейшем увеличении напряжения между катодом и сеткой сила тока снова увеличивается. Но как только напряжение становится равным 9,8 В (4,9 эВ ·2), снова наблюдается резкое падение силы тока. Значит, уже на пути к сетке электроны успевают дважды испытать неупругие столкновения с атомами ртути. И так далее.

Таким образом, результаты данного опыта можно интерпретировать следующим образом. Энергия атомов ртути («внутренняя», а не кинетическая энергия, так как масса атомов ртути значительно больше массы электрона) не может изменяться на произвольную величину и принимать произвольные значения. Ее наименьшее изменение равно 4,9 эВ.

Следовательно, у атомов ртути имеется дискретный набор стационарных состояний.

Справедливость этого вывода подтверждается также тем, что при напряжении 4,9 В пары ртути начинают испускать ультрафиолетовое излучение.

Это возбужденные атомы ртути самопроизвольно переходят в основное состояние, испуская ультрафиолетовые лучи,частота которых в точности соответствует частоте излучения, рассчитанной по формуле Бора. Таким образом, и второй постулат Бора находит в этом опыте свое экспериментальное подтверждение.

§ 5. ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА. КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

В. Гейзенберг
1901 — 1976

П. Дирак
1902 — 1985

Э. Шредингер
1887 — 1961

Л. де Бройль
1875 — 1960

Квантовая теория Бора достигла наибольшего успеха при описании атома водорода — простейшей атомной структуры, состоящей всего из двух частиц. Для атома водорода, как вы знаете, была построена количественная, а не только качественная теория. Однако уже для следующего в периодической системе атома — атома гелия, количественную теорию на основе тех же представлений построить не удалось.

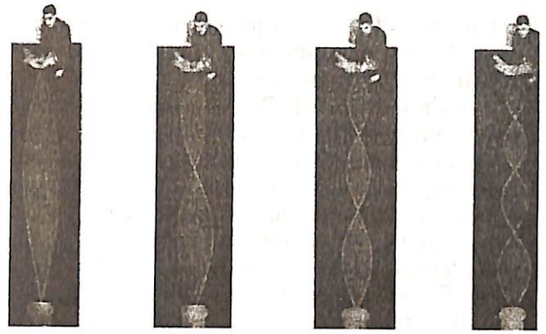
Допускаю, что некоторые из вас испытали, читая эти слова, чувство разочарования. Но если подумать, то ничего удивительного в том, что теория Бора столкнулась с определенными трудностями при описании более сложных атомных систем, — нет.

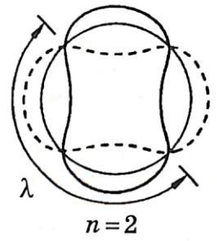
Действительно, отказавшись от классических представлений в отношении атома, мы при расчете боровских орбит использовали законы классической механики и закон Кулона, то есть были непоследовательны в своих действиях.

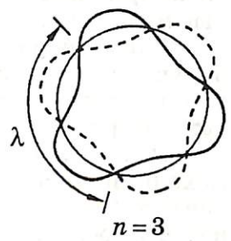
Многие ученые поняли, что дальнейшего прогресса в описании микроскопических систем можно ожидать только на пути последовательного отказа от классических представлений и замены их квантовыми. Так появились **квантовая механика и квантовая электродинамика**.

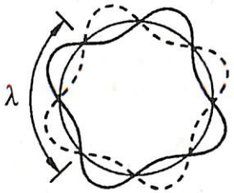
В самом начале отметим, что квантовые теории (в отличие от классической механики, которая связана с именем И. Ньютона, и классической электродинамики, которая связана с именем Д. Максвелла) создавались трудами многих ученых: французского физика Луи де Бройля и австрийского ученого Эрвина Шредингера, немецких физиков Вернера Гейзенберга и Макса Борна и английского ученого Поля Дирака и многих других. Современная наука развивается коллективными усилиями многих ученых из разных стран мира.

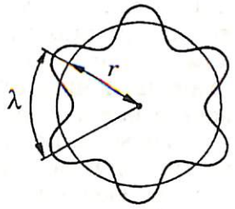
Квантовая механика имеет довольно сложный математический аппарат, но основные ее идеи может понять каждый, кто этого хочет. Вот только нужно приготовиться к тому, что мы не можем создать образы объектов и явлений, которые были бы адекватны микромиру, так как они недоступны не только восприятию нашими органами чувств, но и нашему воображению. По этим причинам мы остановимся только на кратком и качественном описании основных идей квантовой механики.











Связь частоты и длины волны электрона с его энергией и импульсом:

$$\nu_e = \frac{W_e}{h}; \qquad \omega_e = 2\pi\nu_e = \frac{W_e}{\hbar};$$

$$\lambda_e = \frac{h}{p_e}.$$

Правила квантования Бора вытекают из условия, что на длине стационарной орбиты должно укладываться целое число длин волн электрона:

$$2\pi r = n\lambda;$$

$$2\pi r = n\frac{h}{p};$$

$$rp = n\hbar;$$

$$mvr = n\hbar.$$

Начнем с изложения идеи Луи де Бройля. Электродинамика — волновая теория и эта ее особенность должна найти свое отражение при описании движения электрона. Нельзя ли получить из уравнения, описывающего волновое движение, дискретные значения энергии электрона в атоме?

Вспомните, рассматривая стоячие волны в шнуре, мы говорили о том, что они имеют дискретный набор (спектр) собственных частот колебаний. Но так как в квантовой теории энергия кванта прямо пропорциональна его частоте, то дискретному спектру частот будет соответствовать дискретные значения энергии.

В системе отсчета, связанной с ядром атома, энергия системы равна энергии ее электрона. Следовательно, нужно допустить, что электрон — волна, которой в каждом состоянии отвечает своя собственная частота, и, следовательно, вполне определенная энергия. А как найти частоту и длину волны электрона? Точно также, как мы это делали для кванта света: частота равна отношению энергии к постоянной Планка, а длина волны — отношению постоянной Планка к импульсу электрона!

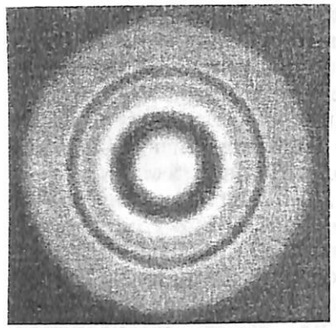
Тогда, рассуждал де Бройль, устойчивому состоянию электрона в атоме должно отвечать такое условие: на стационарной орбите должно укладываться целое число длин волн электрона в этом состоянии. Но если подставить в это выражение значение длины волны электрона, то сразу получится правило квантования, которое «угадмал» Бор!

На рисунках мы показали, стоячие «электронные» волны в атоме водорода для разных стационарных состояний.

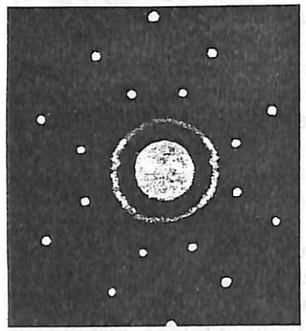
Итак, Луи де Бройль выдвинул гипотезу: **электрон и любые другие частицы должны иметь волновые свойства наряду с корпускулярными**. Таким образом, эта гипотеза распространяла ситуацию, с которой мы столкнулись при изучении электромагнитных волн, на все без исключения виды материи.

Экспериментальным подтверждением этой гипотезы должны были стать опыты по дифракции и интерференции электронов или других частиц материи, в которых можно было бы измерить длину волны и сравнить ее с расчетной по формуле де Бройля.

Такие опыты были проведены в 1927 году американскими физиками К. Д. Дэ-

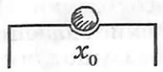


Дифракция электронов на золотой фольге позволила рассчитать длину волны электронов

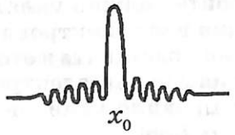


Дифракция нейтронов на кристалле поваренной соли

Принцип неопределенности — прямое следствие нелокализумости волн (ни одна волна не может занимать в пространстве область, меньшую длины волны)



Шарик можно локализовать в углублении стола и его скорость равна нулю



Если частица локализована, то ее скорость измерить невозможно

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar;$$

$$\Delta p_x \geq \frac{\hbar}{\Delta x} = \frac{\hbar}{v_x \Delta t};$$

$$\Delta W \sim v_x \Delta p_x \geq \frac{\hbar v_x}{v_x \Delta t} = \frac{\hbar}{\Delta t};$$

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar$$

Получаем соотношение неопределенностей Бора, где Δt — неопределенность момента времени взаимодействия частицы с измерительным прибором.

виссоном и Л. Х. Джермером, которые наблюдали дифракцию электронов при отражении от монокристаллов.

Позднее Дж. П. Томсон провел опыты по дифракции электронов при прохождении через тонкую металлическую фольгу. На фотографиях, полученных в опытах, мы можем наблюдать дифракционные кольца. По радиусам этих колец можно рассчитать длину волны электронов. Согласие с формулой де Бройля получилось великолепное!

Впоследствии были проведены опыты, в которых ученые наблюдали дифракцию протонов, нейтронов и других частиц, среди которых имеются и атомы и даже отдельные молекулы.

Таким образом, гипотеза де Бройля получила экспериментальное подтверждение: волновые свойства присущи всем видам материи.

Другой подход к созданию квантовой механики был предложен одновременно В. Гейзенбергом, М. Борном и П. Дираком. В качестве основного исходного положения эти ученые выбрали принцип соответствия Бора. Согласно этому принципу, квантовая теория должна приводить к тем же выводам, что и классическая, для больших квантовых чисел n, когда электрон оказывается за пределами атома.

По мнению этих ученых, когда электрон находится в атоме, следует отказаться от ненаблюдаемых в опыте величин и понятий. К числу таких понятий в первую очередь следовало отнести понятие электронной орбиты, то есть понятие траектории движения электрона.

Действительно, если рассматривать электрон в виде волны, то теряют смысл выражения типа «электрон (волна!) находится в данной точке». Но тогда и понятие импульса в данной точке (и скорости) не может иметь смысла, ведь импульс связан с длиной волны, а это понятие уж точно не имеет отношения к точке!

Точно также энергия связана с частотой, то есть величиной, имеющей отношение к неограниченному во времени гармоническому колебательному процессу.

Тогда утверждение, что «электрон можно приблизительно считать материальной точкой» (то есть частицей!), означает, что его координаты, импульс и энергия могут быть заданы только приближенно. И дело здесь не в экспериментальной ошибке измерений, а в **принципе неопределенности**, который был сформулирован и количественно записан в виде **соотношения неопределенностей** В. Гейзенбергом.

Соотношение неопределенности Бора позволяет оценить естественную ширину уровней электрона в атоме. Пусть электрон переходит из состояния 2 в состояние 1. Энергию уровня 2 нельзя считать строго определенной, так как в этом состоянии электрон «живет» всего 10^{-9} с. Тогда:

$$\Delta W_2 = \frac{h}{\Delta t} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}}{10^{-9}\ \text{с}} = 6{,}6 \cdot 10^{-25}\ \text{Дж};$$

$$\Delta W_2 \approx 4 \cdot 10^{-6}\ \text{эВ}.$$

Рассмотрим проблему «точного» измерения с позиций Математика и Физика.

Пусть необходимо измерить длину порядка 10^{-50} м.

Для Математика эта проблема сведется просто к использованию «соответствующего эталона».

Для Физика единственным реальным эталоном («стандартом»), которым можно было бы воспользоваться для проведения этой процедуры, должна быть волна длиной λ, сравнимая с измеряемой длиной по порядку величины.

Независимо от того, выберем ли мы свет или волну другого вида, энергия соответствующего кванта имела бы величину порядка:

$$W = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

$$W = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{10^{-50}} \approx 2 \cdot 10^{25}\ (\text{Дж}).$$

Это количество энергии способно взорвать планету.

Подсчитаем массу m, мгновенная аннигиляция которой сопровождалась бы освобождением этого количества энергии:

$$W = mc^2.$$

$$m = \frac{W}{c^2} = \frac{2 \cdot 10^{25}}{9 \cdot 10^{16}} > 2 \cdot 10^{8}\ (\text{кг}) = 2 \cdot 10^{5}\ \text{тонн}.$$

Этот простой расчет доказывает полную невозможность измерения (10^{-50}м) - отрезков. Здесь взгляды Математика (с его «точками», «непрерывностью» и «бесконечно малыми») расходятся со взглядами Физика, не обсуждающего того, что он не способен измерить.

Согласно соотношению неопределенностей, чем более точно мы задаем импульс частицы, тем большую неопределенность получаем при определении координат этой частицы. Фиксируя координату частицы, мы теряем возможность точного определения ее импульса.

Соотношение неопределенностей можно записать и для энергии. Изменение энергии всегда происходит при изменении состояния системы в течение некоторого промежутка времени. Чем меньше промежуток времени, в течение которого протекает какой-то процесс с частицей, тем больше неопределенность в значении энергии этой частицы.

Проиллюстрируем возможности принципа неопределенности для объяснения некоторых явлений микромира.

Известно, что электрон не падает на ядро. Почему?

При приближении электрона к ядру область его локализации уменьшается. Тогда неопределенность импульса электрона увеличивается, а вместе с ним растет и кинетическая энергия электрона. Электрон движется быстрее и кулоновские силы оказываются не в состоянии «подтянуть» электрон поближе к ядру.

Почему мы «не проваливаемся» под землю, ведь гравитационные силы притягивают нас к центру Земли? Этот вопрос волнует каждого человека в какой-то период его жизни. Слова «действие человека на опору вызывает равное противодействие со стороны опоры и оно компенсирует притяжение Земли» часто воспринимаются как уход от ответа на вопрос. А откуда берется это «противодействие»? Вот как объясняет этот феномен принцип неопределенности.

Атомы «пола» начинают деформироваться под действием веса человека. Это означает, что электроны начинают концентрироваться в меньших объемах. Это ведет к увеличению импульса и кинетической энергии электронов. Их усиливающиеся «толчки» о подошвы ног препятствуют нашему падению вниз.

Известный американский физик Р. Фейнман так писал об этом явлении: «Сопротивление атомов сжатию — это не классический, а квантово-механический эффект. По классическим понятиям следовало ожи-

Объект: пуля

$m = 10^{-2}$ кг;

$v = 900\frac{км}{ч} = 250\frac{м}{с}$;

$\Delta x \geq \frac{\hbar}{mv}$;

$\Delta x \geq \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с}{10^{-2}\ кг \cdot 250\ м \cdot с^{-1}} = 0{,}42 \cdot 10^{-34}$ м;

$\Delta x \ll l_{пули}$;

Объект: автомобиль

$m = 10^{3}$ кг;

$\Delta x = 10^{-10}$ м;

$\Delta v \geq \frac{\hbar}{m\Delta x}$;

$\Delta v \geq \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с}{10^{3}\ кг \cdot 10^{-10}\ м} \approx 10^{-27}\frac{м}{с}$;

$\Delta v \ll v_{автомобиля}$;

Объект: электрон в атоме

$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг;

$\Delta x \approx 10^{-10}$м;

$\Delta v \geq \frac{\hbar}{m\Delta x}$;

$\Delta v \geq \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг \cdot 10^{-10}\ м} = 1{,}1 \cdot 10^{6}\frac{м}{с}$;

$\Delta v \geq 0{,}01c$!

Объект: свободный электрон

$m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг;

$\Delta x \approx 10^{-6}$м;

$\Delta v \geq \frac{\hbar}{m\Delta x}$;

$\Delta v \geq \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг \cdot 10^{-6}\ м} = 1{,}1 \cdot 10^{2}\frac{м}{с}$;

неопределенность в определении скорости свободного электрона такова, что спустя 1 с после определения его положения он может оказаться в любом месте в пределах 110 м. Локализация электрона в какой-то момент времени ограничила знание его местоположения в последующие моменты времени.

дать, что при сближении электронов с протонами энергия уменьшается; наивыгоднейшее расположение положительных и отрицательных зарядов в классической физике — это когда они «сидят верхом» друг на друге. Классической физике это было хорошо известно и представляло загадку: атомы-то все же существовали! Конечно, ученые и тогда придумывали разные способы выхода из тупика, но правильный (будем надеяться) способ стал известен только нам!»

Из-за того, что постоянная Планка, которая входит в соотношение неопределенностей очень мала, последнее имеет решающее значение только для микрочастиц. Для тел, имеющих макроскопические, привычные нам размеры, неопределенность в определении координат, импульсов и энергий столь исчезающе малы, что заметить их в опыте совершенно невозможно.

Например, при фиксации положения тела, имеющего массу порядка 1000 кг (например, легковой автомобиль), с точностью до размеров атома ($\Delta x \sim 10^{-10}$ м) получим неопределенность в определении скорости примерно порядка 10^{-27} м/с.

Ясно, что в реальных измерениях подобную непределенность невозможно обнаружить, так как реальная погрешность измерений на много порядков больше этого значения неопределенности.

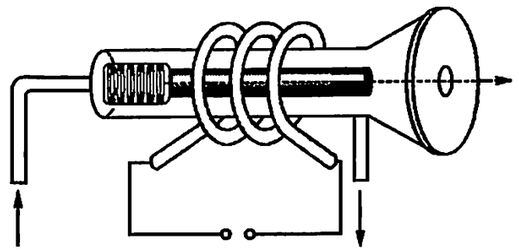
Если же мы имеем дело с электроном, то в пределах атома ($\Delta x \sim 10^{-10}$м) неопределенность в значении его скорости составит примерно 10^{6}м/с, что всего в 100 раз меньше скорости света!

В заключение отметим, что дальнейшее развитие квантовой механики привело к появлению и развитию идеи о том, что возможно (точнее: имеет смысл) только статистическое, вероятностное описание явлений микромира.

Поясним это на таком примере. Пусть атом находится в некотором возбужденном состоянии. Сколько времени он будет оставаться в нем? Это время — случайная величина. Если множество атомов перевести в это возбужденное состояние, то излучать фотоны они будут в разные моменты времени. Так что предсказать, в какой момент времени будет испущен фотон данным атомом нельзя. Предсказания статистической теории относятся либо к большой группе атомов, либо к большой серии повторных опытов с одним из них.

§ 6. ЛАЗЕРЫ — КВАНТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

«Лазер — это устройство, в котором энергия, например, тепловая, химическая, электрическая, преобразуется в энергию электромагнитного поля — лазерный луч. При таком преобразовании часть энергии неизбежно теряется, но важно то, что полученная в результате лазерная энергия обладает более высоким качеством. Качество лазерной энергии определяется ее высокой концентрацией и возможностью передачи на значительное расстояние. Лазерный луч можно сфокусировать в крохотное пятнышко диаметром порядка длины световой волны и получить плотность энергии, превышающую уже на сегодняшний день плотность энергии ядерного взрыва. С помощью лазерного излучения уже удалось достичь самых высоких значений температуры, давления, индукции магнитного поля. Наконец, лазерный луч является самым емким носителем информации и в этой роли — принципиально новым средством ее передачи и обработки». Н. Г. Басов



Свойства лазерного излучения:

1. Лазеры дают пучки света с малым углом расхождения (порядка 10^{-5} рад). Такой пучок, испущенный с Земли, на Луне дает пятно диаметром около 3 км.

2. Излучение строго монохроматическое, оно происходит согласовано, в одинаковой фазе. Поэтому два лазера с одинаковыми рабочими телами дают когерентное излучение.

3. Мощность излучения лазера чрезвычайно высока из-за кратковременности процесса излучения (порядка 10^{-9} с).

4. Плотность потока излучения у некоторых типов лазеров составляет 10^{14} Вт/см², что превышает суммарную по всему спектру солнечную ($7 \cdot 10^{3}$ Вт/см²) примерно на 10 порядков.

5. Напряженность электромагнитного поля в лазерной волне превышает напряженность электромагнитного поля внутри атома.

Заканчивая предыдущий параграф, мы привели пример, иллюстрирующий вероятностный характер излучения света атомами, переходящими самопроизвольно из возбужденного состояния, например, в основное состояние. Возникает вопрос: можно ли «заставить» атомы испускать свет одновременно? Такое явление помогло бы значительно «сконцентрировать» энергию или, иначе, повысить мощность излучения.

В 1917 году А. Эйнштейн предсказал возможность так называемого «вынужденного» или «индуцированного» излучения света атомами. В качестве «затравки» (то есть внешнего воздействия), вызывающей одновременное излучение света многими возбужденными атомами, выступает падающий на них свет такой же частоты.

В этом случае особенностью индуцированного излучения будет то, что оно не отличается от падающего света ни частотой, ни фазой, ни поляризацией.

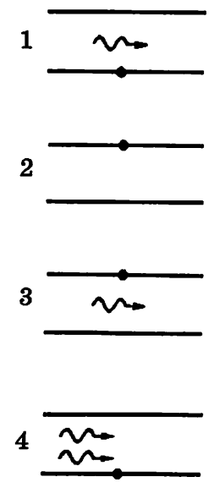
В 1940 году советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность усиления электромагнитных волн при использовании вынужденного излучения. А в 1954 году советские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров (и независимо от них американский физик Ч. Таунс) использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны 1,27 см.

И уже в 1960 году Т. Г. Мейманом в США был создан первый оптический (работающий в области видимой части спектра) квантовый генератор электромагнитных волн — **лазер**.

Принцип действия лазера достаточно прост. Сначала нужно возбудить атомы данного сорта, переведя их в определенное возбужденное состояние, например, облучая холодный газ из этих атомов светом определенной частоты.

Допустим, что таким образом нам удалось возбудить значительную часть атомов среды. Тогда при прохождении через эту среду электромагнитной волны с такой же частотой эта волна будет не ослабляться (из-за поглощения ее квантов другими атомами), а напротив, усиливаться за счет индуцированного излучения.

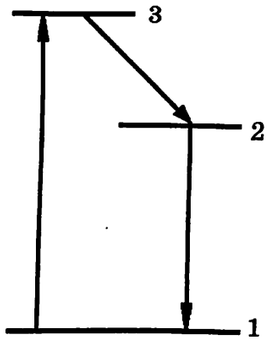
Под воздействием световой волны атомы среды начинают испускать свет согла-



Квант света поглощается атомом...

и переводит его в возбужденное состояние.

Другой квант такой же частоты, пролетая мимо возбужденного атома, индуцирует его излучение. При этом атом возвращается в основное состояние, а световой пучок усиливается.



$1 \to 3$ *Атом поглощает квант света и переходит в возбужденное состояние*

$3 \to 2$ *Атом переходит в состояние 2 без испускания кванта, передавая излишек энергии кристаллической решетке*

$2 \to 1$ *Атом возвращается в основное состояние, испуская квант света*

Рабочее тело	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность излучения, Вт
He — Ne (газ)	1,15	непр.	0,1 ... 5
Cl_2—I (газ)	1,31	имп.	$10^5 \dots 10^7$
Неорган. жидкости	0,22 ... 0,86	имп.	$10^4 \dots 10^6$
CdS (полупр.)	0,49 ... 0,69	имп.	$2 \cdot 10^3$
Рубин (тверд.)	0,69	имп.	$10^6 \dots 10^9$

сованно. На рисунках показано схематически, как происходит усиление света в этом случае.

Остается решить задачу, как перевести в возбужденное состояние большую часть атомов данного газа, «не дать» им излучить свет «раньше времени». Ведь атом испускает свет самопроизвольно, и мы уже говорили, что предсказать, когда этот процесс произойдет, практически невозможно.

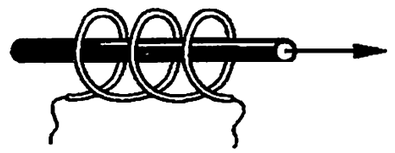
Выход был найден в использовании «трех работающих уровней». Такая трехуровневая система изображена на рисунке. Ее особенностью является то, что, в отсутствии внешнего воздействия, «время жизни» атома в третьем состоянии значительно меньше, чем во втором.

При этом наиболее вероятным является переход из третьего состояния не в основное, а во второе возбужденное состояние. Такая трехуровневая система используется, например, в рубиновом лазере. Рубин — красный кристалл оксида алюминия с примесью (около 0,05%) хрома. Именно ионы хрома образуют трехуровневую систему с такими свойствами.

В состоянии 3 атом «живет» примерно 10^{-8} с, а затем без излучения света самопроизвольно переходит в состояние 2. Излишек энергии при переходе передается кристаллической решетке. «Время жизни» в состоянии 2 составляет примерно 10^{-3} с, то есть примерно в 100000 раз больше. Переход из состояния 2 в состояние 1 под действием электромагнитной волны сопровождается испусканием света.

Таким образом, лазер действует так. Сначала при помощи вспышки мощной лампы атомы возбуждаются и переходят на уровень 3 и затем, спустя малое время, переходят на уровень 2, на котором атом живет сравнительно долго. Так создается «перенаселенность» уровня 2 по сравнению с невозбужденным уровнем 1.

А как включить «спусковой механизм» индуцированного излучения? Для этого в устройстве рубинового лазера имеется следующее. Из кристалла рубина изготавливают стержень цилиндрической формы, торцы которого делают строго параллельными и тщательно полируют. В результате поле того, как ионы хрома перейдут в возбужденное состояние 2, некоторые из них возвращаются в невозбужденное состояние. Если квант света, испущенный при таком переходе «летит» через боковую



Применения лазера:

1. Для осуществления связи, особенно в той частикосмического пространства, где отсутствует поглощение света;
2. Для локации различных объектов, обеспечивающей возможность определения расстояния до них с точностью до миллиметра;
3. В металлургии для получения химически чистых материалов путем испарения в вакууме;
4. Для особо точной и прочной сварки материалов;
5. Для раскроя тканей, стальных листов и пр.;
6. В электронике для соединения мельчайших деталей между собой;
7. Для пробивания отверстий в особо хрупких материалах;
8. В медицине (офтальмологии, косметологии и других областях);
9. Для получения голографических (объемных изображений предметов;
10. Для проведения химических реакций, которые иными способами провести невозможно;
11. В зрелищных театрализованных шоу;
12. Для осуществления управляемой термоядерной реакции.

поверхность стержня, то он просто выходит наружу и «выходит из игры». Если же он летит вдоль оси стержня, то, долетев до торца, отражается от него в обратном направлении. Многократно отражаясь от торцов цилиндра, свет, вызывая индуцированное излучение, многократно усиливается и приобретает уникальные свойства: излучение оказывается когерентным и очень мощным, так как накопленная за большой промежуток времени энергия излучается за очень малый промежуток времени.

Рубиновый лазер работает в импульсном режиме. Другие лазеры, например, газовые, могут работать непрерывно.

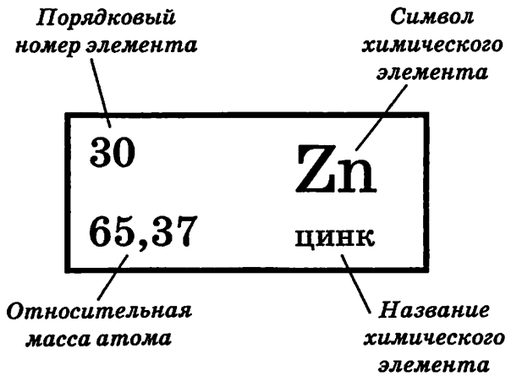
В газовых лазерах рабочим телом является газ. Его атомы возбуждаются электрическим разрядом.

Полупроводниковые лазеры, впервые созданные в нашей стране, возбуждаются при помощи электрического тока.

В зависимости от характеристик рабочего вещества лазеры могут создавать излучение в широком диапазоне длин волн, от инфракрасных (с длиной волны около 10 мкм) до ультрафиолетовых (с длиной волны 0,2 мкм).

Область применения лазера так широка, что перечислить все возможности его использования не представляется возможным. Некоторые из них перечислены в левом столбце параграфа.

§ 7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СТРОЕНИЕ АТОМА»



1. $N = 30$ — число электронов; следовательно, заряд ядра атома $Z = +eN$;
$Z = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\cdot 30 = 48 \cdot 10^{-19}$ Кл;
2. $m = 65{,}37$ а. е. м. $= 65{,}37 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг $=$
$= 1{,}09 \cdot 10^{-25}$ кг .

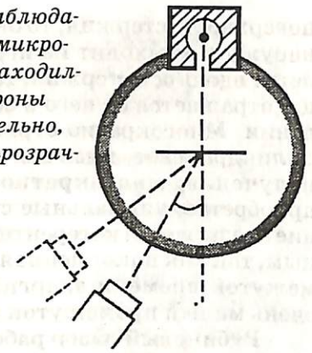
Ввиду того, что количественная теория Бора построена только для атома водорода, в расчетных задачах рассматриваются только такие атомы.

Обычно, при решении подобных задач, если это не оговорено специально, можно пользоваться табличными значениями энергии, которой обладает атом водорода в разных стационарных состояниях.

При решении качественных задач, как обычно, при проведении рассуждений следует помнить о границах применимости тех или иных положений теории Бора.

Полезно также использовать знания, полученные вами при изучении периодической системы Д. И. Менделеева в курсе физики основной школы и курсе химии. В частности, находить по ней основные характеристики атома: число электронов, заряд ядра, массу атома.

Сцинтилляции наблюдались при помощи микроскопа, который находился с внешней стороны экрана, следовательно, он должен быть прозрачным для света.



Задача 1. Для какой цели в опыте Резерфорда применялся люминесцирующий экран? Прозрачный или непрозрачный экран был использован?

Для регистрации и подсчета альфа-частиц необходимо, чтобы микроскопическое явление (столкновение частицы с экраном) вызывало макроскопическое (появление вспышки света). Для этого и служил люминесцирующий экран.

Он должен был быть прозрачным, так как сцинтилляции наблюдали в микроскоп, находящийся с внешней стороны экрана (см. схему опыта Резерфорда).

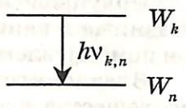
Определение частоты

T — время одного полного оборота;

$$\nu = \frac{1}{T}$$

частота — число оборотов за 1 с.

Излучение атома по Бору



$$\nu_{k,n} = \frac{|W_n - W_k|}{h};$$

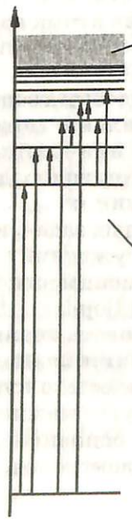
Частота движения электрона по орбите не связана с частотой излучения атома.

Задача 2. Имеется ли какая-нибудь связь между частотой движения электрона вокруг ядра атома водорода и частотой излучения атома водорода?

Для решения задачи нужно вспомнить определение понятия «частота» применительно к круговому движению и воспользоваться вторым постулатом теории Бора, который определяет правило нахождения частоты излучения света атомом.

Сопоставляя эти определения между собой, получим ответ на вопрос задачи.

Изобразим схему энергетических уровней атома водорода.



Здесь энергия электрона может принимать непрерывный ряд значений, так как электрон не связан больше с атомом и является свободной частицей

Находясь внутри атома, электрон может принимать только дискретный ряд значений энергии

Задача 3. Может ли атом водорода поглотить фотон, энергия которого превосходит энергию связи атома?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно, прежде всего , четко представлять себе, что такое «энергия связи».

По определению — это энергия, которую нужно сообщить атому водорода или (что то же самое) его электрону, чтобы превратить атом в две несвязанные частицы : электрон и протон. Эту величину иначе называют «энергией ионизации атома».

Будем предполагать, что энергию атом получает, поглощая фотон.

Если значение энергии фотона меньше значения энергии связи, то электрон может поглотить или не поглотить фотон. Это зависит от того, сможет ли фотон перевести атом в какое-либо стационарное состояние. Ведь энергия электрона, находящегося в атоме может принимать строго определенный дискретный ряд значений.

$$h\nu > 0 - W_1 = |W_1| \equiv W_{св},$$

$$h\nu = W_{св} + \frac{m_e v^2}{2};$$

$$W_к = \frac{m_e v^2}{2} = h\nu - W_{св}.$$

Электрон, поглотив фотон, имеющий энергию большую, чем энергия связи атома, становится свободным и покидает атом, обладая некоторой кинетической энергией

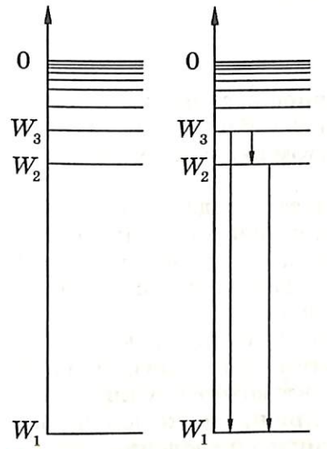
Вне атома электрон — свободная частица, и его энергия может принимать любое значение из непрерывного ряда (так электронам в электронно-лучевой трубке можно сообщить любую разумную энергию). Поэтому, поглотив фотон с энергией, большей энергии связи (ионизации), электрон утратит связь с атомом и приобретет еще кинетическую энергию.

Задача 4. Сколько квантов с различной энергией могут испускать атомы водорода, если они находятся в третьем возбужденном состоянии?

Для решения подобных задач проще всего изобразить (хотя бы примерно, даже не соблюдая строгого масштаба) систему энергетических уровней атома и показать, в каком состоянии (иначе: на каком уровне) находится атом.

Тогда дать ответ на поставленный вопрос будет несложно: ведь из данного состояния атом может переходить спонтанно в любое разрешенное состояние с меньшей энергией.

А если применить второй постулат Бора, то можно записать значения (или даже сосчитать их) частоты этих искомых квантов.



$3 \to 1$

$h\nu_{3,1} = |W_1 - W_3|;$

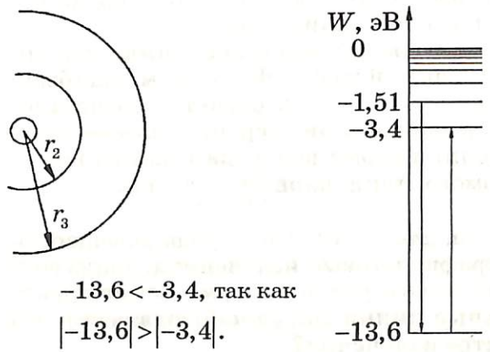
$3 \to 2$

$h\nu_{3,2} = |W_2 - W_3|;$

$2 \to 1$

$h\nu_{2,1} = |W_1 - W_2|;$

При переходе атомов водорода из третьего состояния в основное возможно излучение квантов трех разных частот: $\nu_{3,1}, \nu_{3,2}, \nu_{2,1}$.



$-13,6 < -3,4$, так как $|-13,6| > |-3,4|$.

$3 \to 1$

$\Delta W = W_1 - W_3 = -13,6 - (-1,51) = -12,09$ (эВ);

$\Delta W < 0$, *квант «уносит» энергию, то есть происходит излучение света.*

$$h\nu_{3,1} = |\Delta W_{3,1}|; \qquad \nu_{3,1} = \frac{|\Delta W_{3,1}|}{h};$$

$$\nu_{3,1} = \frac{12,09 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж}}{6,6 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}} = 2,9 \cdot 10^{15}\ \text{Гц}$$

Задача 5. В каком случае энергия атома больше: когда электрон находится на удаленной от ядра орбите или когда он находится на самой близкой к ядру орбите?

Решение этой задачи, если подойти к нему формально, тривиально: чем ближе к ядру находится электрон, тем более устойчивой оказывается атом. А из двух состояний более устойчивое то, у которого энергия (потенциальная) меньше.

Можно подойти к ответу на вопрос с формальной позиции математики: выбрать два состояния, выписать из справочника их энергии и сравнить между собой.

Однако при решении задач учащиеся часто допускают ошибки из-за «путаницы» со знаками. Особенно, когда надо подсчитать энергию кванта света или его частоту. Ведь энергия кванта и его частота не могут быть отрицательными.

Мы предлагаем во всех таких случаях пользоваться общим правилом: находить изменение энергии при переходе из одного

$1 \to 2$

$\Delta W = W_2 - W_1 = -3,4 - (-13,6) = 10,2$ (эВ);

$\Delta W > 0$, *квант «приносит» энергию, то есть происходит поглощение света.*

$$h\nu_{1,2} = |\Delta W_{1,2}|; \qquad \nu_{1,2} = \frac{|\Delta W_{1,2}|}{h};$$

$$\nu_{1,2} = \frac{10,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж}}{6,6 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}} = 2,5 \cdot 10^{15}\ \text{Гц}$$

Расчетные задачи

Дано:	*СИ:*
атом водорода	
$k \to n$	
$n = 2$	$W_2 = -3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
$\lambda = 486$ нм	$486 \cdot 10^{-9}$ м
W_k — ?	
k — ?	

Решение:

1. $\Delta W_{k,n} = W_n - W_k; \qquad \Delta W_{k,n} < 0;$

$h\nu_{k,n} = |\Delta W_{k,n}|; \quad \Delta W_{k,n} = -h\nu_{k,n}$

$W_k = W_n - \Delta W_{k,n} = W_n - (-h\nu_{k,n}) = W_n + h\nu_{k,n};$

2. $\nu_{k,n} = \dfrac{c}{\lambda_{k,n}}; \qquad W_k = W_n + \dfrac{hc}{\lambda_{k,n}};$

3. $W_k = -3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} + \dfrac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{486 \cdot 10^{-9}} =$

$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (-3,4 + \dfrac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{486 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}) =$

$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (-3,4 + 2,55)$ (Дж) $= -0,85$ эВ;

$k = 4$.

Ответ: $W_k = -0,85$ эВ, $k = 4$.

Дано:	*СИ:*	*Справочные данные:*
атом водорода		$W_1 = -13,6$ эВ
$\lambda = 102$ нм	$102 \cdot 10^{-9}$ м	$W_2 = -3,4$ эВ
		$W_3 = -1,51$ эВ
λ_i — ?		$W_4 = -0,85$ эВ

Решение:

1. Определим энергию состояния, в котором оказываются атомы водорода при облучении светом указанной длины волны:

$$h\nu = W_k - W_1;$$

$$\frac{hc}{\lambda} = W_k - W_1; \qquad W_k = \frac{hc}{\lambda} + W_1.$$

$[W_k] = \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} + \text{Дж} = \text{Дж}.$

состояния в другое. Тогда знак получившейся величины будет иметь однозначное толкование: если изменение энергии системы отрицательное (энергия уменьшается), следовательно, квант света «уносит» с собой эту энергию.

Если изменение энергии положительное (энергия возрастает), то квант должен «принести» с собой эту энергию. Для подсчета значения частоты излучения нужно будет взять модуль изменения энергии.

Задача 6. Атом водорода переходит во второе стационарное состояние, излучая свет с длиной волны 486 нм. В каком состоянии находился атом первоначально?

При решении этой задачи нужно воспользоваться схемой энергетических состояний атома водорода и применить схему рассуждений, проведенных нами при решении предыдущей задачи.

Поскольку атом испускает квант света, то он переходит в состояние с меньшей энергией. Этот факт может служить в качестве ориентира при проверке полученного значения энергии и определении квантового числа n.

Записывая выражение для изменения энергии атома и учитывая, что длина волны зависит от частоты и скорости света, получим формулу для расчета энергии начального состояния атома.

При вычислении значения энергии сразу переведем его в эВ, чтобы можно было без дополнительных расчетов воспользоваться значениями энергии стационарных состояний атома водорода и найти номер искомого стационарного состояния.

Задача 7. Атом водорода освещается ультрафиолетовым излучением, длина волны которого равна 102 нм. Какие спектральные линии могут наблюдаться в его спектре излучения?

При решении этой задачи будем исходить из разумного предположения, что первоначально атомы водорода находятся в основном состоянии.

В таком случае, нужно подсчитать, на каком уровне находятся атомы водорода после облучения их светом указанной частоты.

Затем, обращаясь к результатам задачи 4, нужно изобразить на схеме уровней все переходы, которые могут возникать при переходе атома из найденного состояния в основное и во все возбужденные нижележащие, а из них — в основное состояние.

Наконец, пользуясь вторым постулатом Бора, нужно подсчитать частоту, а по ней и длину волны спектральных линий, которые могут наблюдаться в описанном случае.

При проведении расчетов удобно выражать энергию в электронвольтах (эВ), так как в справочной литературе значения энергии стационарных состояний обычно приводятся в этих физических единицах.

Для перевода энергии из джоулей в электронвольты следует воспользоваться определением: 1эВ — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 В, то есть 1 эВ $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Таким образом, чтобы выразить энергию в электронвольтах, нужно разделить значение энергии, подсчитанное в джоулях, на $1,6 \cdot 10^{-19}$.

Обратите внимание на то, что среди полученных значений длин волн обязательно должна присутствовать и длина волны излучения, которое перевело атомы водорода в возбужденное состояние.

Задача 8. Возникнет ли фотоэффект на литии, если его облучать фотонами, которые испускают атомы водорода при переходе из стационарного состояния с энергией $-0,54$ эВ в состояние с энергией $-3,4$ эВ? Красная граница для лития равна 520 нм.

Решение этой задачи не должно вызвать затруднений, если вы понимаете сущность явления фотоэффекта.

Это явление наблюдается, если энергии падающего на данный металл кванта света достаточно, чтобы вырвать электрон с поверхности металла. То есть, выражаясь научным языком, энергия кванта должна быть больше или равна работе выхода электрона из данного металла.

Поскольку «красная граница» фотоэффекта — это максимальная длина волны излучения, при которой фотоэффект возможен (то есть именно она и определяется работой выхода для данного металла), то для решения задачи достаточно подсчитать длину волны излучения, возникающего в данном переходе, и сравнить ее с красной границей.

2. Проведем вычисления, выражая энергию в эВ:

$$W_k = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{102 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} + (-13,6) =$$

$= 12,1 - 13,6 = -1,5$ (эВ).

3. Определим номер состояния и перечислим возможные переходы из него в основное состояние:

$k = 3$;

возможны переходы: $3 \to 1$; $3 \to 2$; $2 \to 1$.

4. Рассчитаем длину волны излучения.

$$\frac{hc}{\lambda_{nk}} = |W_k - W_n|; \qquad \lambda_{nk} = \frac{hc}{|W_k - W_n|};$$

$$\lambda_{3,1} = \frac{hc}{|W_1 - W_3|}; \ \lambda_{3,2} = \frac{hc}{|W_2 - W_3|}; \ \lambda_{2,1} = \frac{hc}{|W_1 - W_2|};$$

$$\lambda_{3,1} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{|-13,6 + 1,5| \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,02 \cdot 10^{-7}\ \text{(м)};$$

$$\lambda_{3,2} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{|-3,4 + 1,5| \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,5 \cdot 10^{-7}\ \text{(м)};$$

$$\lambda_{2,1} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{|-13,6 + 3,4| \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,2 \cdot 10^{-7}\ \text{(м)}$$

Ответ: будут наблюдаться линии с длиной волны 102 нм; 120 нм и 650 нм.

Дано:	*СИ:*
литий	
$\lambda_{max} = 520$ нм	$520 \cdot 10^{-9}$ м
водород	
$W_k = -0,54$ эВ	$-0,54 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
$W_n = -3,4$ эВ	$-3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

происходит ли фотоэффект,
то есть $\lambda_{kn} < \lambda_{max}$?

Решение:

1. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v^2}{2}; \quad h\nu_{min} = A_{вых}; \quad \frac{hc}{\lambda_{max}} = A_{вых}.$$

2. Из второго постулата Бора:

$$h\nu_{kn} = |W_n - W_k|; \quad \frac{hc}{\lambda_{kn}} = |W_n - W_k|.$$

3. Фотоэффект происходит, если:

$$|W_n - W_k| \geq A_{вых}; \ \lambda_{kn} = \frac{hc}{|W_n - W_k|} \leq \lambda_{max};$$

$$\lambda_{kn} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{|-3,4 + 0,54| \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,33 \cdot 10^{-7}\ \text{(м)}$$

5. 433 нм $<$ 520 нм, фотоэффект происходит.

Дано: *СИ:*

Н-водород

дифракционная решетка

$d = 5$ мкм $\quad 5 \cdot 10^{-6}$ м

$k = 5$

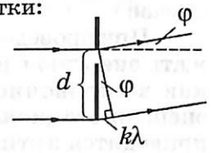
$\varphi = 41^0$

λ — ?

$m \to n$ — ?

Решение:

1. Для дифракционной решетки:



$$d\sin\varphi = k\lambda; \quad \lambda = \frac{c}{\nu};$$

$$d\sin\varphi = \frac{kc}{\nu}; \quad \nu_{mn} = \frac{kc}{d\sin\varphi}.$$

2. Излучение атома водорода:

$$h\nu_{mn} = |W_n - W_m|.$$

3. Проведем вычисления:

$$\nu_{mn} = \frac{5\cdot 3\cdot 10^8}{5\cdot 10^{-6}\sin 41^\circ} = \frac{5\cdot 3\cdot 10^8}{5\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}66} = 4{,}5\cdot 10^{14} \text{ (Гц)};$$

$$h\nu_{mn} = 6{,}6\cdot 10^{-34}\cdot 4{,}5\cdot 10^{14} = 29{,}7\cdot 10^{-20} \text{ (Дж)} =$$

$$= \frac{29{,}7\cdot 10^{-20}}{1{,}6\cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 1{,}9 \text{ эВ}.$$

4. Воспользуемся значениями энергии стационарных состояний атома водорода:

$W_1 = -13{,}6$ эВ; $W_2 = -3{,}4$ эВ; $W_3 = -1{,}5$ эВ;...

$|W_2 - W_3| = |-3{,}4 - (-1{,}5)|$ эВ $= 1{,}9$ эВ;

Ответ: наблюдаемая спектральная линия имеет частоту $4{,}5 \cdot 10^{14}$ Гц и соответствует переходу из третьего состояния во второе.

Задача 9. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от газоразрядной трубки, наполненной атомарным водородом. Постоянная решетки 5 мкм. Какому переходу электрона соответствует спектральная линия, наблюдаемая при помощи этой решетки в спектре пятого порядка под углом 41^0?

Для решения задачи нужно вспомнить, как происходит дифракция волн на дифракционной решетке. Изобразим ход двух лучей, испытавших дифракцию на соседних отверстиях решетки.

Поскольку известны постоянная решетки и угол, под которым наблюдается дифракционный максимум известного порядка, то пользуясь уравнением дифракционной решетки, можем найти длину волны падающего на решетку излучения.

Теперь можно подсчитать частоту света, падающего на решетку, и энергию кванта света соответствующей частоты.

Так как эти кванты света излучаются атомарным водородом, то необходимо знать значения энергии атома водорода в стационарных состояниях. Эти сведения можно найти в справочных материалах.

Остается подобрать такие состояния, при переходе между которыми излучается квант вычисленной нами энергии.

Обычно при решении «школьных» задач достаточно знать значения энергии пяти – шести нижних уровней энергии, поэтому проблема подбора пары состояний не слишком сложна.

Дано: *СИ:*

$W_1 = 21{,}6$ эВ

$W_2 = 41$ эВ

$W_3 = 64$ эВ

$\lambda = 25$ нм $\quad 25 \cdot 10^{-9}$ м

Решение:

1. $\dfrac{hc}{\lambda_{\min}} = \dfrac{6{,}6\cdot 10^{-34}\cdot 3\cdot 10^8}{25\cdot 10^{-9}} = 0{,}79\cdot 10^{-17}$ (Дж);

$$\frac{hc}{\lambda_{\min}} = \frac{0{,}79\cdot 10^{-17}}{1{,}6\cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 49{,}5 \text{ эВ}.$$

2. $W_{\text{квантов}} \le 49{,}5$ эВ, так как $\lambda = \lambda_{\min}$;

$$W_{\text{квантов}} = W_{\text{иониз}} + W_{\text{к.е}};$$

$49{,}5$ эВ > 41 эВ $> 21{,}6$ эВ,

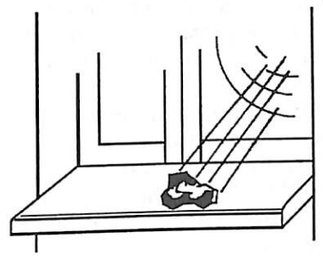
поэтому возможны однократная и двукратная ионизация атомов неона.

Задача 10. Для однократной, двукратной и трехкратной ионизации атома неона требуется энергия, равная соответственно 21,6 эВ, 41 эВ и 64 эВ. Какую степень ионизации можно получить, облучая неон рентгеновскими лучами, наименьшая длина волны которых равна 25 нм?

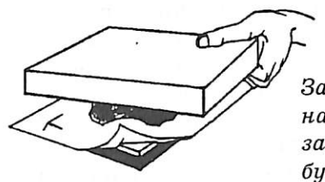
Для решения задачи необходимо сравнить энергию кванта света с энергией ионизации атома неона.

При этом нужно помнить, что при ионизации выполняется закон сохранения энергии, и уравнение этого процесса аналогично уравнению Эйнштейна для фотоэффекта: вырывая из атома электрон, квант сообщает электрону также кинетическую энергию. Поэтому квант, способный провести двукратную ионизацию, способен также и на однократную.

§ 8. ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ. СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

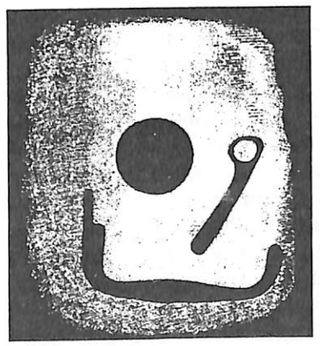


Кусочек урановой соли облучали солнечным светом



Затем помещали его на фотопластинку, завернутую в черную бумагу

Отпечаток на фотопластинке имеет форму кусочка руды



Снимок, сделанный А. Беккерелем при помощи радиоактивного излучения

Радиоактивное излучение

1. имеет большую проникающую способность;

2. сильно ионизирует воздух;

3. быстро разряжает электроскоп.

В то время, когда Резерфорд предложил планетарную модель атома, а Бор сформулировал свои знаменитые постулаты, никто уже не сомневался в том, что атом имеет сложное строение. Более того, задолго до этого было открыто явление, которое доказывало, что сложное строение имеет также и ядро атома. Это явление носит название **естественной радиоактивности** и своим открытием обязано французскому физику Анри Беккерелю.

А. Беккерель долгое время исследовал явление послесвечения (или фосфоресценции) веществ, которые предварительно подвергались облучению солнечным светом. К числу исследуемых веществ относились, в первую очередь, соли урана.

Ученый заинтересовался излучением этих солей и хотел выяснить, не входят ли в его состав, наряду с видимым излучением, рентгеновские лучи. С этой целью он завернул свежую фотопластинку в плотную черную бумагу, сверху положил кусочки урановой соли и выставил все это на яркий солнечный свет.

После проявления фотопластинки Беккерель обнаружил ее почернение именно в тех участках, где лежала соль. Из этого следовало, что соли урана испускают излучение, которое, подобно рентгеновским лучам, свободно проникает сквозь черную бумагу. Это излучение Беккерель связывал с действием солнечных лучей на соли урана.

В феврале 1896 года Беккерелю пришлось отложить запланированные опыты из-за пасмурной погоды. Он убрал в ящик стола завернутую в черную бумагу фотопластинку и положил на нее сверху металлический крест, покрытый солью урана. Спустя два дня ученый проявил фотопластинку и обнаружил на ней четкий отпечаток креста. Это означало, что **соли урана испускают проникающее излучение самопроизвольно, то есть и без влияния внешних факторов** (без освещения солнечным светом).

Теперь Беккерель занялся исследованием этого самопроизвольного излучения и вскоре обнаружил, что оно сильно ионизирует воздух и быстро разряжает электроскоп. Испробовав в опытах разные соли урана, Беккерель обнаружил очень важ-

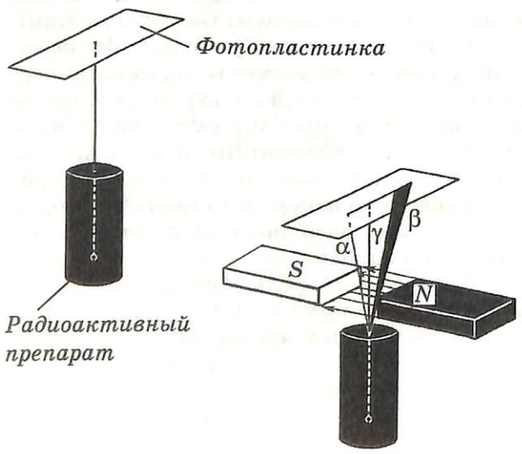
М. Склодовская-Кюри
1867 — 1934

84	Po
[210]	полоний

88	Ra
[226]	радий

90	Th
232	торий

92	U
238	уран



ный факт: интенсивность излучения зависит только от количества урана, содержащегося в исследуемом препарате, и совсем не зависит от того, в состав какой соли уран входит. Беккерель сделал совершенно правильный вывод: исследуемое излучение присуще не веществу, а химическому элементу — атомам урана.

Естественно было попытаться найти другие химические элементы, способные, подобно урану,к самопроизвольному излучению. В 1898 году М. Склодовская-Кюри и ее муж П. Кюри обнаружили аналогичное излучение у тория.

Тщательное исследование руд, содержащих уран и торий, позволило супругам Кюри выделить новый, до тех пор неизвестный химический элемент, полоний, а затем и радий (в переводе означающий «лучистый») — химический элемент, дающий очень интенсивное излучение.

От него произошло и название явления: **радиоактивность.**

В дальнейшем было установлено, что все химические элементы, имеющие в периодической системе Д. И. Менделеева порядковые номера, начиная с 84, являются радиоактивными.

Тщательные опыты показали, что никакие внешние факторы: давление, температура, химический состав, солнечное освещение — не оказывают влияния на интенсивность излучения данного химического элемент. Оно происходит с удивительным постоянством.

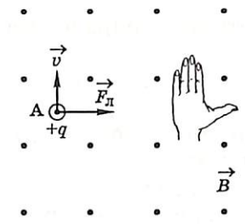
Многие исследователи занялись изучением радиоактивных элементов и их излучения. Их интересовали, в первую очередь, состав и физическая природа этого излучения. Среди этих ученых был и Э. Резерфорд.

Обратимся к классическому опыту, позволившему обнаружить сложный состав радиоактивного излучения. Его схема изображена на рисунке.

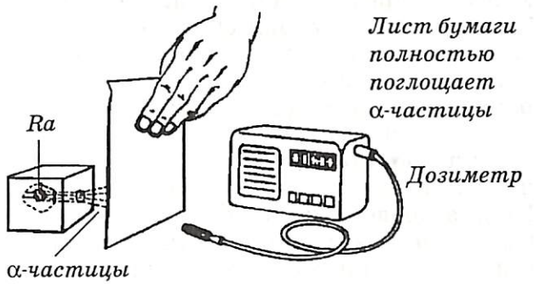
Радиоактивный препарат (радий) помещали на дно узкого канала в куске свинца. Таким образом выделяли узкий пучок излучения.

Напротив выходного отверстия, перпендикулярно лучу, располагали фотопластинку, на которой после облучения обнаруживали пятно.

Когда установку помещали в сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны направлению распространения пучка, то пучок рападался на три компонента.



Пользуясь правилом левой руки можно определить знак заряда частицы, испытавшей отклонение в магнитном поле

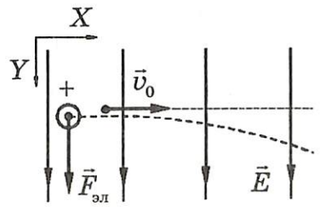


Лист бумаги полностью поглощает α-частицы

Алюминиевая пластинка толщиной в несколько миллиметров полностью поглощает β-частицы

γ-лучи проходят даже через свинцовые пластины толщиной в несколько десятков сантиметров

Движение α–частицы в электрическом поле:



$$\vec{F}_{эл} = q\vec{E};$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{эл}}{m} = \frac{q}{m}\vec{E};$$

$$\Delta y = y - y_0 \equiv h,$$

$$\Delta x = x - x_0 \equiv L,$$

Было установлено, что степень поглощения γ-лучей зависит от толщины преграды и свойств данного вещества.

А при одинаковой толщине преграды γ-лучи поглощаются тем сильнее, чем больше порядковый номер химического элемента-поглотителя в периодической системе.

Уже первые опыты с радиоактивными излучениями показали, что физическая природа α, β и γ-лучей различна. Остановимся на опытах, в которых она была установлена.

Альфа-частицы. Установить природу α-частиц оказалось довольно сложно, так как они довольно слабо отклонялись магнитными и электрическими полями, которые в то время ученые могли получать в лаборатории. Однако, опыты по отклонению α-частиц в электрическом и магнитном полях позволили измерить удельный заряд этих частиц: он оказался примерно в два

$$h=\frac{a_y t^2}{2}=\frac{q}{m}\cdot\frac{Et^2}{2};$$

$$L=v_0 t;$$

$$h=\frac{q}{m}\cdot\frac{EL^2}{2v_0^2}.$$

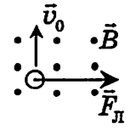
Известные величины: E, L, h.

Неизвестные величины: $\frac{q}{m}$, v_0.

Движение α-частицы в магнитном поле:

$$F_Л=qv_0B;$$

$$a_{ц.с.}=\frac{F_Л}{m}=\frac{q}{m}\cdot v_0B;$$



$$a_{ц.с.}=\frac{v_0^2}{R};$$

$$\frac{v_0^2}{R}=\frac{q}{m}\cdot v_0B;$$

$$\frac{v_0}{BR}=\frac{q}{m}.$$

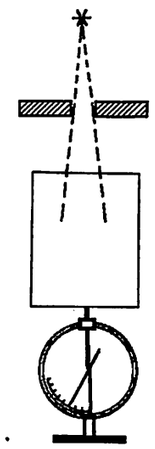
Известные величины: B, R.

Неизвестные величины: $\frac{q}{m}$, v_0.

Решая систему уравнений, получим:

$$v_0=\frac{EL^2}{2BRh};$$

$$\frac{q}{m}=\frac{EL^2}{2B^2R^2h}.$$



Установка для измерения заряда альфа-частицы

раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода.

Теперь для определения массы α-частицы нужно было измерить ее заряд. Для измерения заряда можно было воспользоваться чувствительным электрометром, соединенным с металлическим цилиндром, внутрь которого в течение некоторого промежутка времени попадали α-частицы. Электрометр измерял суммарный заряд всех попавших в него частиц, следовательно, нужно было знать число частиц, чтобы рассчитать заряд одной из них.

Конечно, можно было оценить число частиц по сцинтилляциям, которые они производили, падая на специальный экран. Но для проведения более точных опытов был сконструирован счетчик Гейгера*. Сквозь очень тонкое окно α-частицы проникали в счетчик Гейгера и регистрировались им в течение некоторого времени. Так определялось число частиц, попадающих в счетчик за 1 с.

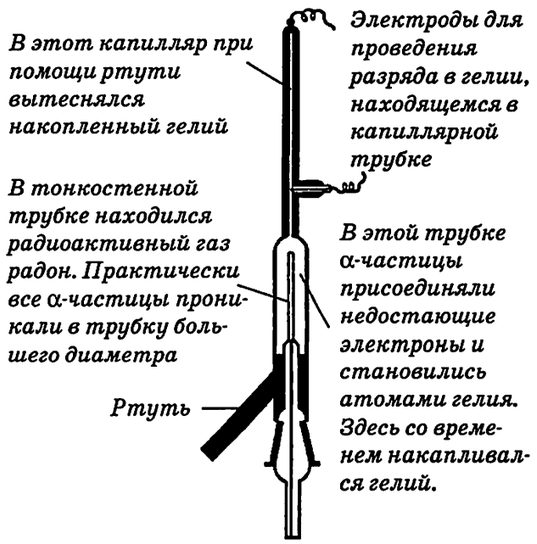
Описанные опыты показали, что заряд α-частицы в два раза больше заряда протона (то есть элементарного положительного заряда). Тогда масса α-частицы больше массы протона в 4 раза и равна примерно массе атома гелия — следующего за водородом химического элемента в периодической системе Менделеева.

Резерфорд предположил, что α-частицы — ионизованные атомы гелия (в то время опыты по рассеянию α-частиц еще не были проведены и о существовании ядер у атомов не было известно). Чтобы проверить эту гипотезу, Резерфорд предложил следующий опыт.

В течение нескольких дней α-частицы «накапливались» в сосуде с ртутью, из которого был откачан воздух. В этом сосуде (по гипотезе Резерфорда) ионы гелия, присоединив к себе недостающие электроны, становятся нейтральными атомами. Таким образом, если гипотеза верна, в безвоздушном пространстве над ртутью со временем накапливается гелий. Идентифицировать его можно при помощи спектрального анализа.

Для этого гелий из большого сосуда вытеснялся ртутью в капиллярную трубку и производился газовый разряд. Затем полученный спектр сравнивали со спектром излучения гелия.

* С устройством счетчика Гейгера мы знакомились в курсе физики основной школы. Более подробно его действие мы рассмотрим в § 19.


В этот капилляр при помощи ртути вытеснялся накопленный гелий
В тонкостенной трубке находился радиоактивный газ радон. Практически все α-частицы проникали в трубку большего диаметра
Ртуть
Электроды для проведения разряда в гелии, находящемся в капиллярной трубке
В этой трубке α-частицы присоединяли недостающие электроны и становились атомами гелия. Здесь со временем накапливался гелий.

Установка для «накапливания» альфа-частиц и проведения спектрального анализа образовавшегося газа

Альфа-частицы:

1. Ядра атома гелия;
2. $q=+2e=+3{,}2\cdot10^{-19}$ *Кл;*
3. $m=4$ *а.е.м.* $=6{,}64\cdot10^{-27}$ *кг;*
Если частица образовалась при распаде ядер радия, то:
4. $v=20000$ *км/с ;*
5. $W=8$ *МэВ;*
6. Длина свободного пробега в воздухе примерно равна 10 см;
7. Полное число альфа-частиц, испускаемых за 1с 1г радия, составляет $3{,}7\cdot10^{10}$.

Бета-частицы:

1. Электроны;
2. $q=-e=-1{,}6\cdot10^{-19}$ *Кл;*
3. $m=9{,}1\cdot10^{-31}$ *кг;*
Если частица образовалась при распаде ядер радия, то:
4. $v=60000$ *км/с ... 180000 км/с ;*
5. $W=10$ *кэВ ... 100 кэВ;*
6. Длина свободного пробега в воздухе примерно равна 10 см.

Гамма-лучи:

1. Электромагнитное излучение;
2. $\lambda=10^{-10}\ldots10^{-13}$ *м;*
3. $\nu=3\cdot10^{18}\ldots3\cdot10^{21}$ *Гц;*
4. $c=300000$ *км/с.*

Проведенные опыты блестяще подтвердили гипотезу Резерфорда: α-частицы — полностью ионизованнные атомы гелия (то есть, его ядра).

Теперь, зная заряд и массу α-частиц, можно было определить их скорость и энергию. Таким образом, исследование этих частиц позволило измерить все их основные характеристики и установить природу этого вида излучения.

Бета-частицы. Как уже говорилось, эти частицы сравнительно легко отклонялись как в электрическом, так и в магнитном полях.

Зная направление полей, можно было определить знак заряда этих частиц — отрицательный. А знание значений векторов напряженности электрического и индукции магнитного полей позволило рассчитать значение удельного заряда этих частиц. Оно совпало со значением удельного заряда электрона.

Эти опыты позволили установить, что β-частицы представляют собой электроны, движущиеся с огромными скоростями (близкими к скорости света).

Как показали опыты, скорости β-частиц, испущенных данным радиоактивным препаратом в отличие от α-частиц, оказались неодинаковыми. При этом разброс в значениях скоростей оказался весьма существенным.

Гамма-лучи. Этот вид радиоактивного излучения по своим свойствам оказался очень похожим на рентгеновское излучение. Только его проникающая способность оказалась значительно более высокой.

Поскольку рентгеновское излучение — это высокочастотное электромагнитное излучение, то было высказано предположение, что и наблюдавшиеся γ-лучи представляют собой электромагнитное излучение еще более высокой частоты, чем рентгеновское.

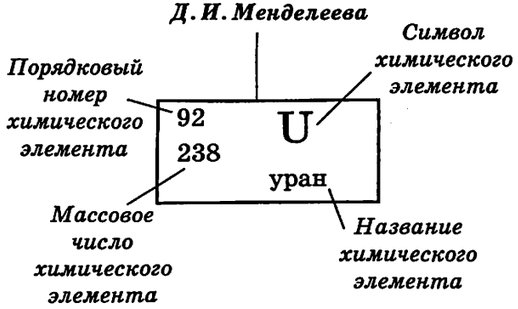
Это предположение получило опытное обоснование, когда были проведены опыты по дифракции гамма-излучения на кристаллах и была измерена их длина волны.

Она оказалась очень малой: от 10^{-10} до 10^{-13} м, то есть порядка размеров атома и его ядра. На шкале частот электромагнитных излучений γ-лучи следуют непосредственно за рентгеновскими лучами.

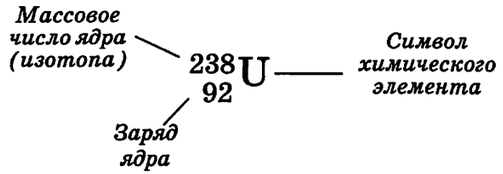
Скорость гамма-лучей в вакууме равна скорости света, то есть такая же, как у всех видов электромагнитного излучения — 300000 км/с.

§ 9. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Клетка периодической системы Д. И. Менделеева



Обозначение химического элемента, принятое в ядерной физике:



Условное обозначение альфа-частицы:

$$^{4}_{2}\mathrm{He}$$

$$^{228}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\mathrm{Ra} + ^{4}_{2}\mathrm{He};$$

$$^{224}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\mathrm{Rn} + ^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Торий	Радий	Радон
$^{228}_{90}\mathrm{Th}$	$^{224}_{88}\mathrm{Ra}$	$^{220}_{86}\mathrm{Rn}$
серебристо-белый металл	серебристо-белый металл	газ
плотность 11,7 г/см³	плотность 5,5 г/см³	плотность (н.у.) 0,0098 г/см³
температура плавления 1750 °С	температура плавления 969 °С	температура кипения – 62 °С
химически активен	химически очень активен	химически инертен

Что происходит с атомом при радиоактивном распаде? Такой вопрос возник сразу после открытия этого явления, но получить на него ответ оказалось не так-то просто. При исследовании радиоактивности ученые с самого начала обнаружили много странного и необычного.

Прежде всего, они обнаружили удивительное постоянство, с которым известные в то время уран, радий и торий испускают излучения. Мы уже отмечали, что никакие физические и химические воздействия (например, нагревание, давление, химические реакции) не оказывают влияния на интенсивность излучения: на протяжении суток, месяцев и многих лет радиоактивный препарат, содержащий уран, радий или торий, излучают постоянно.

Другой факт — радиоактивность сопровождается выделением энергии — также вызывал недоумение: откуда же «берется» эта энергия?

В своих опытах П. Кюри помещал ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нем поглощались практически все альфа- и бета-частицы и, частично, гамма-излучение. За счет их энергии калориметр и его содержимое нагревались. Кюри определил, что 1 г радия за 1 ч выделяет примерно 582 Дж энергии. И эта энергия выделяется постоянно на протяжении многих лет!

Этот факт привел ученых к предположению, что при радиоактивности происходят какие-то неизвестные изменения вещества, отличные от обычных химических превращений. Так было высказано предположение, что **при радиоактивности превращения претерпевают сами атомы!**

Эта гипотеза была подтверждена сравнительно быстро. Так в опытах Э. Резерфорда и Ф. Содди было обнаружено следующее.

Если поместить радиоактивный препарат тория в закрытую пробирку, то его активность (то есть число распадов в единицу времени) остается неизменной.

Если пробирку открыть и обдувать слабым потоком воздуха, то активность тория резко падает. Резерфорд предположил, что вместе с альфа-частицами торий испускает какой-то газ, которые тоже является радиоактивным. Этот газ он назвал «эманацией» (истечением) тория. Откачивая этот

газ из пробирки с торием, Резерфорд выделил этот газ и исследовал его физические свойства.

Оказалось, что ионизирующая способность этого газа очень быстро убывает со временем: каждую минуту активность уменьшается примерно вдвое, так что уже через 10 минут она оказывается практически равной нулю.

Содди исследовал химические свойства этого газа. Он нашел, что «эманация тория» не вступает ни в какие химические реакции, то есть этот газ — инертный.

Впоследствии этот газ (эманация тория) получил свое современное название — радон (^{220}Rn) и нашел свое место в 86 клетке периодической системы Менделеева.

Дальнейшие исследования показали, что похожие превращения претерпевают и другие радиоактивные элементы. Так ученые пришли к выводу о том, что атомы радиоактивных элементов самопроизвольно (спонтанно) изменяются. Сначала какие-то атомы данного сорта становятся неустойчивыми, это приводит к их взрывообразному распаду, в результате которого вылетает «осколок» ядра — альфа-частица.

В некоторых случаях, у атомов других химических элементов, «взрыв»-распад сопровождается вылетанием быстрого электрона (бета-частица). Во всех случаях излучение альфа- и бета- частиц сопровождается появлением гамма-излучения.

Таким образом, радиоактивные превращения приводят к появлению химических элементов, которые ранее отсутствовали в исследуемом препарате.

Эти появившиеся дочерние химические элементы отличаются от материнских иными физическими и химическими свойствами и обычно также являются радиоактивными. Они, в свою очередь, испытывают радиоактивный распад, испуская характерное для себя излучение.

При этом выделяется огромное, по сравнению с химическими превращениями, количество энергии.

Сегодня вам известно, что свойства химического элемента определяются зарядом его ядра, так что при радиоактивных превращениях претерпевают изменения именно ядра атомов. В левом столбце мы привели **правила смещения**, при помощи которых можно определить, какие дочерние ядра образуются из данного ядра при данном виде распада.

Правила смещения

1. Обозначения:

$^{A1}_{Z1}\mathrm{X}$ — *материнское ядро;*

$^{A2}_{Z2}\mathrm{Y}$ — *дочернее ядро.*

2. Если данное ядро претерпевает альфа-распад, то:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y};$$

$A = 4 + (A - 4)$ — *по закону сохранения массового числа;*

$Z = 2 + (Z - 2)$ — *по закону сохранения электрического заряда.*

3. Если данное ядро претерпевает бета-распад, то:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow ^{0}_{-1}e + ^{A}_{Z+1}\mathrm{Y};$$

$A = 0 + A$ — *по закону сохранения массового числа;*

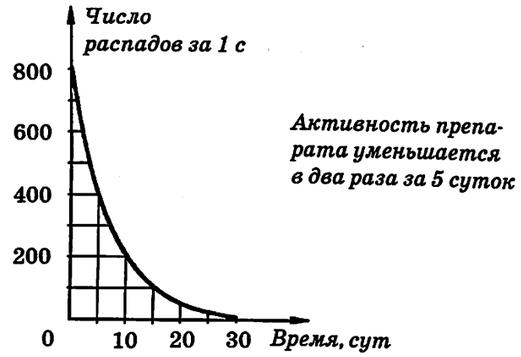
$Z = -1 + (Z + 1)$ — *по закону сохранения электрического заряда.*

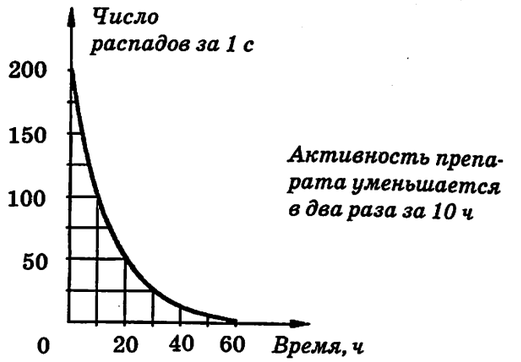
$$^{238}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[\alpha]{} ^{234}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\beta]{} ^{234}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[\beta]{} ^{234}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[\alpha]{} \ldots \rightarrow ^{206}_{82}\mathrm{Pb}$$
стабилен

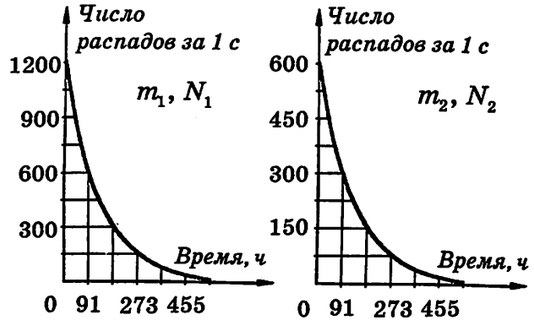
$$^{235}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[\alpha]{} ^{231}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\beta]{} ^{231}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[\alpha]{} ^{227}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow[\alpha]{} \ldots \rightarrow ^{207}_{82}\mathrm{Pb}$$
стабилен

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\alpha]{} ^{228}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow[\beta]{} ^{228}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow[\beta]{} ^{228}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\alpha]{} \ldots \rightarrow ^{208}_{82}\mathrm{Pb}$$
стабилен

$$^{237}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow[\alpha]{} ^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[\beta]{} ^{233}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[\alpha]{} ^{229}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[\alpha]{} \ldots \rightarrow ^{205}_{81}\mathrm{Tl}$$
стабилен







$m_1 = 2m_2, \quad N_1 = 2N_2.$

Закон радиоактивного распада

N_0 – число радиоактивных ядер в исследуемом образце.

$\frac{N_0}{2}$ – столько ядер распадется через $t = T$, где T – период полураспада;

$\frac{N_0}{2}$ – столько радиоактивных ядер останется в образце через $t = T$.

$\frac{1}{2}\cdot\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{2^2}$ – столько радиоактивных ядер останется к моменту $t = 2T$;

В основе этих правил лежит известный вам закон сохранения электрического заряда и еще один важный закон — сохранения числа нуклонов (массового числа), о котором мы будем говорить чуть позже. А пока обратимся к закону, описывающему радиоактивный распад.

Этот закон был установлен Э. Резерфордом опытным путем при исследовании зависимости активности радиоактивных препаратов от времени. Сначала определим, как можно характеризовать активность препарата.

При помощи счетчика Гейгера можно, например, подсчитывать число частиц, которые образуются в результате распада ядер, находящихся в исследуемом препарате, за единицу времени. Если допустить, что в каждом акте распада выделяется одна альфа-частица (или одна бета-частица), то число зарегистрированных за 1 с частиц данного сорта равно числу ядер, претерпевших данный вид распада за 1 с.

На рисунках приведены экспериментальные кривые, полученные разными исследователями с разными радиоактивными препаратами. Обратите внимание: вид зависимости у разных химических элементов один и тот же. Если выделить характерные точки графиков, то можно заметить, что для каждого сорта атомов существует свое характерное время: время, в течение которого число распадов за 1 с (или иначе активность препарата) убывает в два раза. Этот промежуток времени получил название **периода полураспада**.

Период полураспада — самая важная характеристика радиоактивных ядер.

Чтобы понять смысл этого постоянного для данного сорта ядер числа, сравним между собой два графика, полученных при исследовании активности двух радиоактивных препаратов радона(^{222}Rn), отличающихся по начальной массе (а значит, и по числу исходных атомов и ядер) в два раза. Смотрите, за одно и то же время (примерно за 91 час) в препарате, имеющем в два раза меньшую массу, распадается в два раза меньше атомов, чем в другом!

Это говорит о том, что радиоактивный распад подчиняется статистическому закону: период полураспада определяет не абсолютное число распадов, а долю атомов, которые испытают распад за данное время. А именно: половина всех атомов за время, равное периоду полураспада.

$\frac{1}{2}\cdot\frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^3}$ – столько радиоактивных ядер останется к моменту $t = 3T, \ldots$

К моменту $t = nT$ $\left(n = \frac{t}{T}\right)$ еще не распадутся:

$$N = \frac{N_0}{2^n} = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T}}} \quad \text{или} \quad N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \text{ ядер.}$$

Химический элемент	Условное обозначение изотопа	Период полураспада
Уран	$^{238}_{92}$U	$4{,}5 \cdot 10^9$ лет
	$^{235}_{92}$U	$7{,}1 \cdot 10^8$ лет
	$^{234}_{92}$U	$2{,}5 \cdot 10^5$ лет
Торий	$^{234}_{90}$Th	24,1 суток
	$^{232}_{90}$Th	$1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет
	$^{228}_{90}$Th	1,9 года
Радий	$^{228}_{88}$Ra	6,7 года
	$^{226}_{88}$Ra	1620 лет
	$^{225}_{88}$Ra	14,8 суток
Радон	$^{222}_{86}$Rn	3,8 суток
	$^{220}_{86}$Rn	51,4 с
	$^{219}_{86}$Rn	3,9 с
Углерод	$^{11}_{6}$C	20,4 мин
	$^{14}_{6}$C	5700 лет

$\tau \approx 1{,}4T$ — *среднее время жизни радиоактивного ядра*

$N_{св}$ – число ядер свинца в минерале;

$N_{расп} = N_{св}$, так как каждое распавшееся ядро урана в конце превращений стало ядром свинца.

$N_{урана}$ – число ядер урана в минерале.

$$N_{урана} + N_{св} = N_0;$$

$$N_{урана} = \left(N_{урана} + N_{св}\right)2^{-\frac{t}{T}};$$

$$1 + \frac{N_{св}}{N_{урана}} = 2^{\frac{t}{T}}; \qquad t = T\log_2\left(1 + \frac{N_{св}}{N_{урана}}\right).$$

Значит, скорость распада с течением времени не меняется, атом «не стареет» и распадается не «от старости», а «по случаю». Следовательно, к радиоактивному атому нельзя применить понятие «возраст атома»: он может просуществовать, начиная от рождения, как доли секунды, так и миллиарды лет.

Поэтому предсказать, когда произойдет распад данного конкретного ядра, невозможно. С уверенностью можно лишь утверждать, что примерно половина всех ядер испытает распад за время, равное периоду полураспада, да и то только тогда, когда речь идет о большом числе атомов.

Иллюстрацией этого утверждения может служить такой опыт. Если поднести к счетчику, дающему звуковой сигнал (щелчок) при регистрации частицы, радиоактивный препарат с малой активностью, то щелчки будут следовать друг за другом нерегулярно, хаотически.

Между некоторыми из них временной интервал будет весьма значительным, а иногда щелчки следуют друг другом так быстро, что почти сливаются в один.

Здесь вероятностный характер распада ощущается непосредственно, ведь каждый щелчок — сигнал о распаде одного ядра из миллионов ядер, находящихся в препарате.

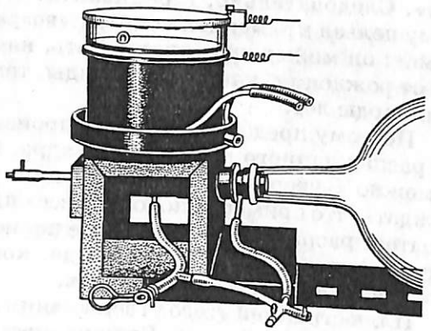
Статистический характер радиоактивного распада является следствием того, что законы поведения микрочастиц, то есть законы микромира, являются статистическими, вероятностными. Таким образом, описание процессов, происходящих в ядрах атомов, является задачей квантовой механики.

Теория вероятности, которую мы в школе не изучаем, позволяет определить **«среднее время жизни»** атома. Это — среднее арифметическое времён жизни достаточно большого количества атомов данного сорта. Оно прямо пропорционально периоду полураспада.

Периоды полураспада у ядер разных сортов значительно отличаются друг от друга. Сведения о них приведены в таблице слева.

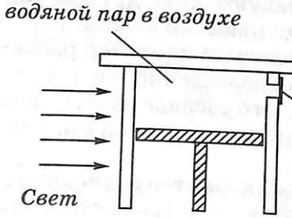
В заключение заметим, что поскольку каждая цепочка радиоактивных превращений заканчивается образованием стабильного ядра, то анализ минералов, содержащих радиоактивные вещества, позволяет определить возраст данной породы или Земли.

§ 10. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ПРОТОН И НЕЙТРОН — СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ЯДРА

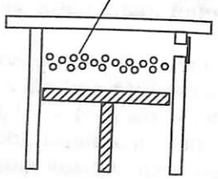


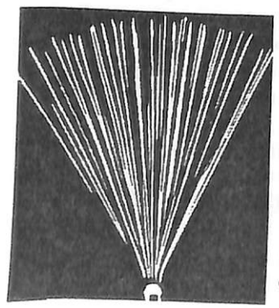
Внешний вид одной из первых камер Вильсона

Камера Вильсона — прибор, в котором можно наблюдать треки (следы) альфа-частиц и других ионизирующих излучений


Перенасыщенный водяной пар в воздухе
Тонкое окошко. Через него в рабочий объем камеры проникают ионизирующие излучения
Свет

Ионы и электроны, образованные при прохождении альфа-частицы в камере Вильсона, становятся центрами конденсации водяных паров, образуя трек — цепочку мельчайших капелек воды на пути движения частицы.





Так выглядит фотография треков альфа-частиц, испускаемых ядрами полония, в камере Вильсона, заполненной воздухом при давлении 540 мм. рт. ст.

Явление радиоактивного распада ядер однозначно свидетельствует о сложном строении атомного ядра. Известно, что ядро атома водорода — простейшего из атомов — представляет собой положительно заряженную частицу: протон. А каково строение ядер других, более массивных и более сложных атомов?

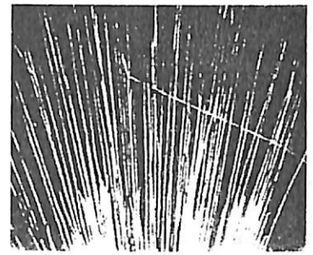
Вы, конечно, помните ответ на этот вопрос, так как изучали его и в курсе физики, и в курсе химии основной школы: ядро состоит из протонов и нейтронов. Но часто знание «окончательного» ответа скрывает главное.

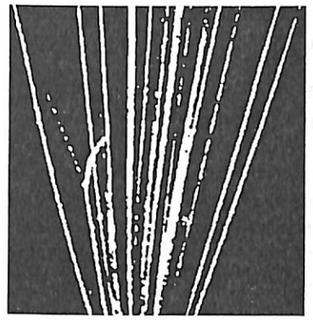
Это — путь познания, который, с одной стороны, позволяет проследить развитие идей и получить убедительные доказательства этого знания. А с другой стороны, — расширить горизонты познания, формулируя новые вопросы, ответы на которые еще следует получить. Поэтому рассмотрим этот вопрос более основательно.

Явление естественной радиоактивности продемонстрировало, что ядра большинства стабильных химических элементов весьма устойчивы: никакие химические и обычные физические воздействия не могут их разрушить и вызвать их превращения в другие элементы (или даже просто ускорить радиоактивный распад неустойчивых ядер). Поэтому Резерфорд предположил, что для разрушения или преобразования ядра нужна очень большая энергия. И «доставлена» она должна быть непосредственно этому ядру.

Самым подходящим «носителем энергии» в то время были альфа-частицы, возникающие при радиоактивном распаде. Именно их и использовал Резерфорд для проведения опытов по искусственному превращению ядер. Первое такое превращение Резерфорд наблюдал в 1920 году в камере Вильсона.

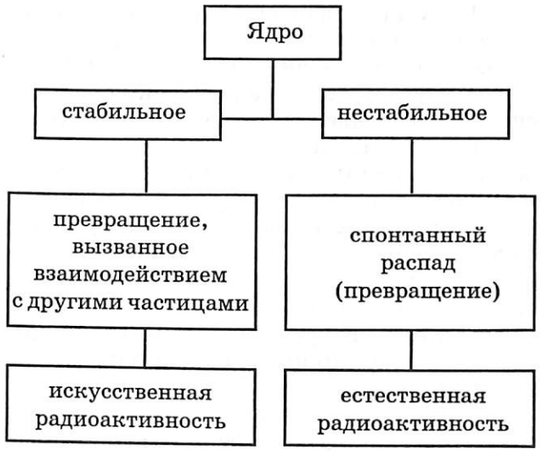
В камере Вильсона, как вы помните, альфа-частицы оставляют при движении треки, которые можно сфотографировать. Если камера Вильсона заполнена воздухом, то 78% ее объема приходится на долю молекул азота. Треки подавляющего большинства альфа-частиц в камере Вильсона представляют собой прямые линии. Их нетрудно увидеть на многочисленных фотографиях, одну из которых мы приводим.





На некоторых фотографиях, полученных в камере Вильсона, можно наблюдать разветвления треков — «вилки».

Они свидетельствуют о том, что альфа-частица испытала столкновение с ядром и вызвала его превращение.



Первое искусственное превращение атомного ядра, вызванное альфа-частицей

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Практически все треки пронизывают камеру Вильсона «насквозь». И только один из них (а Резерфорд подсчитал, что такое событие происходит примерно с одной альфа-частицей из 50 тысяч!) оканчивается «вилкой» — разветвлением трека. Один трек «вилки» — короткий и жирный, другой — более тонкий и длинный.

Естественно предложить следующую интерпретацию наблюдаемых треков.

Большинство альфа-частиц свободно проходят в воздухе камеры Вильсона, не испытывая взаимодействия с ядрами атомов. С молекулами или атомами альфа-частицы, конечно, взаимодействуют: они ионизируют атомы, превращая их в ионы, которые становятся центрами конденсации водяных паров, содержащихся в воздухе камеры. Именно поэтому и образуется трек из капелек воды в камере Вильсона.

Теряя небольшую часть своей энергии, массивные альфа-частицы продолжают двигаться в прежнем направлении, так как электроны, как вы помните, не способны изменить направление их движения. Это могут сделать только ядра атомов, так как именно они имеют массу того же порядка, что и масса альфа-частицы.

Тогда «вилка» на треке свидетельствует именно о столкновении альфа-частицы с ядром атома. К чему приводит это столкновение? Возможны, по крайней мере, два варианта ответа на этот вопрос. Первый: альфа-частица передает часть энергии ядру, в результате она сама изменяет направление движения и появляется новый трек, который оставляет «ядро отдачи». В таком случае никакого «ядерного превращения» не происходит.

Второй вариант таков: альфа-частица вызывает ядерное превращение, в результате которого образуются две новые частицы (они и оставляют наблюдаемые треки).

Какому из вариантов ответа отдать предпочтение? Решить это может только количественная обработка результатов опыта. Используя закон сохранения импульса, Резерфорд пришел к выводу, что жирный след принадлежит ядру кислорода, а тонкий — протону, ядру атома водорода.

Тогда можно записать уравнение искусственного превращения ядра азота под действием альфа-частицы, используя закон сохранения электрического заряда и закон сохранения массового числа. Появление протона в этом превращении свидетель-

Ядро гелия (альфа-частица):

1. $m_\alpha \approx 4m_p$;

2. $q_\alpha = 2e$.

Допустим, что в состав ядра гелия входят 4 протона (тогда $m_\alpha = 4\,m_p$) и 2 электрона (тогда $q_\alpha = 2e$). Из соотношения неопределенностей Гейзенберга имеем:

$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$;

$\Delta x \approx 10^{-13}$ см $= 10^{-15}$ м;

$W = \dfrac{p^2}{2m}$, следовательно,

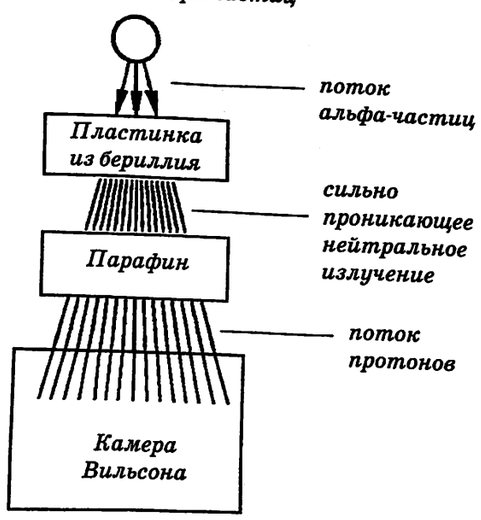
$$\Delta W \approx \frac{(\Delta p)^2}{2m} \geq \frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2};$$

$$[\Delta W] \approx \left[\frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2}\right] = \frac{\text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{Дж}} = \text{Дж};$$

$$\Delta W \geq \frac{\left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2}{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left(10^{-15}\right)^2} = 0{,}06 \cdot 10^{-7} \text{ Дж};$$

$$\Delta W \geq \frac{0{,}06 \cdot 10^{-7}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ эВ} = 4 \cdot 10^{4} \text{ МэВ}.$$

Источник альфа-частиц



ствует о том, что эти частицы входят в состав ядер других химических элементов.

Открытие протона и определение его характеристик (заряда и массы) поставило исследователей перед новой проблемой. Суть ее состоит в следующем. Возьмем ядро гелия, следующего за водородом химического элемента. Масса его ядра (альфа-частицы) почти точно в 4 раза больше массы протона. Если допустить, что в состав этого ядра входит 4 протона, то его заряд оказывается в 2 раза больше, чем это имеет место в опыте.

Можно было бы допустить, что в состав такого ядра входят, например, два электрона (так что суммарный заряд всех частиц равен 2). Но в этом случае координата электрона локализована с точностью до размеров ядра, то есть имеет неопределенность порядка 10^{-13} см. Если воспользоваться соотношением неопределенностей Гейзенберга, то можно оценить порядок разброса значений энергии электрона в ядре.

Полученное значение так велико, что на несколько порядков превышает энергию альфа-частицы, способной выбить из ядра протон, то есть никакие электрические силы не способны удержать электрон внутри ядра.

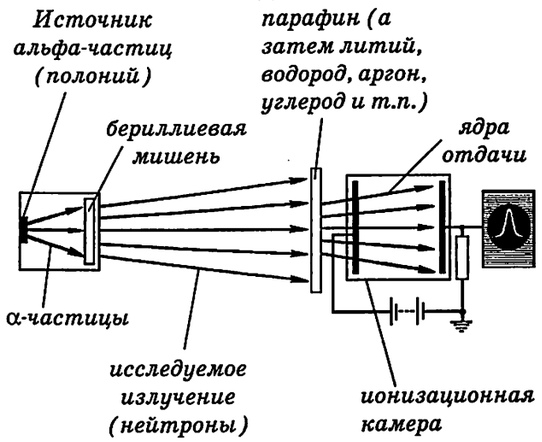
Следовательно, вопрос о строении ядра оставался открытым. Это продолжалось до 1932 года, когда ученик Резерфорда Д. Чедвик сделал важнейшее для всей ядерной физики открытие — он открыл нейтрон.

Открытию нейтрона предшествовали опыты французских физиков-исследователей И. Жолио-Кюри и Ф. Жолио-Кюри, которые бомбардировали альфа-частицами пластину, изготовленную из бериллия.

Ученые предполагали, что альфа-частицы будут выбивать из бериллия протоны, однако этого не происходило: они обнаружили на выходе из пластины излучение, которое обладало огромной проникающей способностью. Оно проходило даже через свинцовые бруски толщиной в 20 см. Так как это излучение было незаряженным, то супруги Жолио-Кюри предположили, что это гамма-лучи большой энергии.

Дальнейшее исследование этого «бериллиевого излучения» привело к удивительному открытию. Если на его пути поставить парафиновую пластинку, то за ней возникает мощное ионизирующее излучение. Ученые предположили, что это — поток протонов, так как парафин — водородосодержащее вещество. Они исследовали

Установка Д. Чедвика



Ядра отдачи ионизировали атомы газа, заполняющего ионизационную камеру. Между электродами, на которые подавалось напряжение порядка 1000 В, возникал импульс тока, который регистрировался осциллографом.

Измеряя этот импульс, можно определить энергию ядер отдачи и их скорость.

Рассмотрим центральное упругое столкновение.
1-ая частица (нейтрон): m_n; $v_{0n} = v_{к,n} \equiv v_n$;
2-ая частица (ядро отдачи): $m_я$; $v_{0я} = 0$; $v_{к,я} \equiv v_я$.

$$m_n\vec{v}_{0n} + m_я\vec{v}_{0я} = m_n\vec{v}_{к,n} + m_я\vec{v}_{к,я};$$

$$\frac{m_n v_{0n}^2}{2} + \frac{m_я v_{0я}^2}{2} = \frac{m_n v_{к,n}^2}{2} + \frac{m_я v_{к,я}^2}{2}$$

(см. Физика-10. Механика, с.144, задача 4)

$$v_я = \frac{2m_n}{m_n + m_я} v_n.$$

Если ядро отдачи – водород, то: $v_H = \dfrac{2m_n}{m_n + m_H} v_n$.

Если ядро отдачи – азот, то: $v_N = \dfrac{2m_n}{m_n + m_N} v_n$.

Тогда отношение скоростей разных ядер отдачи:

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m_n + m_N}{m_n + m_H},$$

и можно определить массу нейтрона:

$$m_n = \frac{m_N - \dfrac{v_H}{v_N} m_H}{\dfrac{v_H}{v_N} - 1}.$$

$${}^{9}_{4}\text{Be} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{1}_{0}n$$

ионизирующее излучение при помощи камеры Вильсона и установили, что это действительно протоны.

По длине трека протона, как вы знаете, можно подсчитать его энергию. А по энергии протона — примерно оценить энергию гамма-кванта, который «выбил» протон из парафина. Значение этой энергии получалось огромным: около 55 МэВ!

Д. Чедвик повторяя опыты с бериллиевым излучением, использовал ионизационную камеру, соединив ее с осциллографом. По его оценкам значение энергии гамма-лучей, способных сообщить такие скорости протонам, должно было быть еще больше — около 90 МэВ.

А когда Чедвик использовал вместо парафина другие вещества, например, аргон и наблюдал «ядра отдачи» аргона (то есть ядра, с которыми сталкивались предполагаемые гамма-лучи), то энергии бериллиевого излучения пришлось приписать энергию около 150 Мэв.

Таким образом, если считать, что протоны выбиваются из парафина частицами (гамма-квантами), не имеющими массы покоя, получалось, что одним и тем же гамма-лучам приходилось приписывать разную энергию. Поэтому Чедвиг высказал предположение, что бериллиевое излучение представляет собой поток частиц, имеющих массу покоя. Эти частицы не имеют электрического заряда, так как они непосредственно не ионизируют газ и, поэтому, обладают большой проникающей способностью: ведь они при движении не теряют энергию на ионизацию.

Эта частица было названа **нейтроном**. Существование такой частицы предсказывал в свое время Резерфорд. Теперь она была обнаружена и Чедвику предстояло определить ее массу. Для этого он воспользовался фотографиями, на которых были запечатлены случаи столкновения нейтронов с ядрами разных химических элементов в камере Вильсона. Полагая, что в каждом таком акте происходит центральное и абсолютно упругое соударение нейтрона с ядром, он рассчитал массу нейтрона.

Она оказалась несколько большей, чем масса протона, но ее массовое число. как и у протона, примерно равно единице.

Вот теперь можно записать уравнение ядерной реакции, которая привела к открытию нейтронов, входящих, как и протоны, в состав атомного ядра.

§ 11. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ИЗОТОПЫ. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Соотношение неопределенностей не запрещает находиться внутри ядра нейтронам и протонам:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar;$$

$$\Delta x \approx 10^{-13} \text{ см} = 10^{-15} \text{ м};$$

$$W = \frac{p^2}{2m_n}, \text{ следовательно,}$$

$$\Delta W \approx \frac{(\Delta p)^2}{2m_n} \geq \frac{\hbar^2}{2m_n(\Delta x)^2};$$

$$[\Delta W] \approx \left[\frac{\hbar^2}{2m_n(\Delta x)^2}\right] = \frac{\text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{Дж}} = \text{Дж};$$

$$\Delta W \geq \frac{\left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2}{2 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot \left(10^{-15}\right)^2} \approx \cdot 10^{-12} \text{ Дж};$$

$$\Delta W \geq \frac{10^{-12}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 10^7 \text{ эВ} = 10 \text{ МэВ}.$$

Протон, p

1. Элементарная частица;
2. $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг = 1 а.е.м;
3. $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл = +1 (элементарный заряд);
4. участвует в гравитационном, электромагнитном и ядерном взаимодействиях.

Нейтрон, n

1. Элементарная частица;
2. $m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг = 1 а.е.м;
3. $q_n = 0$;
4. участвует в гравитационном и ядерном взаимодействиях.

Атомное ядро, $^A_Z X$

Z — число протонов в составе ядра равно порядковому номеру химического элемента в периодической системе Менделеева;
N — число нейтронов в составе ядра данного химического элемента может меняться в некоторых пределах, определяет разные изотопы этого химического элемента;
A = Z + N — массовое число ядра; округленная до целого значения относительная масса атома химического элемента.

Открытие нейтрона имело поистине революционное значение.

Действительно, до сих пор физика обходилась двумя видами фундаментальных взаимодействий: гравитационным и электромагнитным, и тремя «кирпичиками» (элементарными частицами) мироздания: электроном, фотоном и протоном.

С появлением нейтрона в физику пришла не только еще одна элементарная частица — появилось еще одно фундаментальное взаимодействие: ядерное или сильное.

Сразу после того, как Д. Чедвик открыл нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий ученый В. Гейзенберг предложили **протонно-нейтронную модель атомного ядра**. Эта модель была свободна от недостатков прежних моделей. В частности, соотношение неопределенностей «разрешало» находиться внутри ядра массивным нейтронам и протонам. Эта модель объясняла все известные к тому времени факты о ядерных превращениях. Дальнейшие исследования подтвердили ее справедливость.

Согласно этой модели ядра состоят из протонов и нейтронов. Число протонов в ядре равно числу электронов в нейтральном атоме, то есть порядковому номеру химического элемента в периодической системе Менделеева.

Сумма числа протонов и числа нейтронов в ядре называется **массовым числом** ядра. Как вы помните, массы нейтрона и протона близки друг другу и примерно равны 1 а.е.м. — единице массы, принятой в ядерной физике.

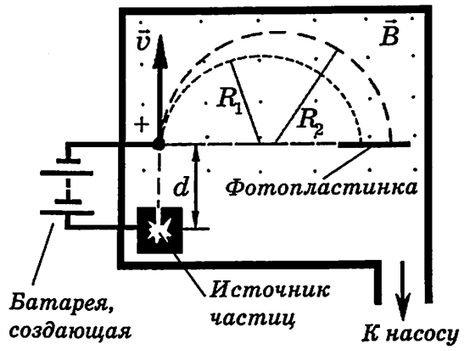
Массовое число ядра можно найти округлив относительную массу атома, указанную в периодической системе Менделеева, до целого числа.

Если число протонов в составе ядра данного химического элемента строго постоянная величина, то число нейтронов может изменяться в некоторых пределах.

Ядра химического элемента, отличающиеся друг от друга числом нейтронов, называются **изотопами**.

Это название отражает тот факт, что эти ядра занимают одну клетку периодической системы Менделеева, так как химические свойства изотопов полностью идентичны. В этом нет ничего удивительного,

		Водород	Дейтерий	Тритий
Символ		$^1_1$H	$^2_1$H	$^3_1$H
Z		1	1	1
N		0	1	2
A		1	2	3
радиоакт.		стабилен	стабилен	β^-, 12 лет
вода, H_2O	ρ	1г/см³	1,1 г/см³	
	$t_к$ °C	100 °C	101°C	
	$t_{пл}$ °C	0°C	+3,8 °C	



1. Движение иона в электрическом поле:

$$\Delta W_к = A_{эл.\ поля};$$

$$\Delta W_к = \frac{m_1 v_1^2}{2} - 0 = \frac{m_1 v_1^2}{2};$$

$$A_{эл.\ поля} = qU;$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = qU.$$

2. Движение иона в магнитном поле:

$$\vec{F}_Л = m_1 \vec{a}_{ц.с.};$$

$$F_Л = q v_1 B \sin\alpha = q v_1 B;$$

$$a_{ц.с.} = \frac{v_1^2}{R_1};$$

$$q v_1 B = \frac{m_1 v_1^2}{R_1}; \quad v_1 = \frac{q}{m_1} B R_1.$$

3. Исключая скорость частицы из уравнений, получим:

$$\frac{m_1 \cdot (qBR_1)^2}{2m_1^2} = qU; \quad m_1 = \frac{qB^2 R_1^2}{2U}.$$

ведь как известно из курса химии, химические свойства элемента определяются его порядковым номером, то есть электрическим зарядом ядра.

При этом физические свойства изотопов, вообще говоря, различны. В таблице приведены некоторые сведения о водороде, дейтерии и тритии — так называются три изотопа водорода, существующие в природе.

Изотопы химических элементов были открыты при изучении естественной радиоактивности. Английский химик Ф. Содди обнаружил, что существуют химические элементы, имеющие разные радиоактивные свойства (то есть распадающиеся разными способами), но тождественные по своим химическим свойствам. Их нельзя было разделить любыми известными химическими способами.

Напротив, физическими методами изотопы можно разделить. Это блестяще продемонстрировал Дж. Дж. Томсон, который предпринял точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрических и магнитных полях.

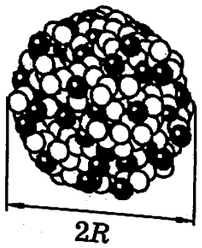
Томсон обнаружил, что природный неон представляет собой смесь двух сортов атомов. Большая их часть имеет относительную массу, равную 20. Но существует и незначительная часть атомов с относительной массой 22. Таким образом, относительная масса смеси этих атомов (то есть природного неона) равна 20,2.

Поскольку изотопы данного химического элемента отличаются друг от друга числом нейтронов, а значит, и массой ядер, то именно масса ядра определяет, будет ли данный изотоп стабильным или радиоактивным.

В настоящее время установлено, что изотопы имеются у всех химических элементов, но не все химические элементы имеют стабильные изотопы. В частности, мы уже отмечали, что все ядра, имеющие заряд больше 82, являются радиоактивными.

Значит, заряд ядра атома определяет не все его свойства, а только химические.

Кроме массы атомное ядро имеет размеры. Так как мы имеем дело с микрочастицами, то и в случае атомного ядра можно говорить только о некотором среднем значении радиуса атомного ядра. Его можно оценить в опытах по рассеянию падающих на него частиц (именно так Резерфорд оценил размеры ядер золота в своих знаменитых опытах).



$2R$

$$R \approx 1{,}2 \cdot \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

$$m_{\text{ядра}} \approx A; \quad V_{\text{ядра}} = \frac{4}{3}\pi R^3;$$

$$\rho = \frac{m_{\text{ядра}}}{V_{\text{ядра}}} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi \cdot \left(1{,}2 \cdot \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-13}\right)^3}$$

$$\rho \approx \frac{A}{4 \cdot 1{,}2^3 \cdot A \cdot 10^{-39}} \frac{\text{а.е.м.}}{\text{см}^3} \approx$$

$$\approx \frac{1{,}7 \cdot 10^{-24}}{4 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-39}} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 2{,}5 \cdot 10^{14} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Ядерные силы:

1. Возникают при взаимодействии нуклонов;

2. Это силы притяжения;

3. Превосходят электромагнитные силы, возникающие между двумя протонами, находящимися внутри ядра, примерно в 100 раз;

3. Действуют на расстояниях ~ 10^{-13} см и быстро стремятся к нулю при увеличении расстояния между нуклонами;

4. Обладают зарядовой независимостью, то есть $F(p, p) = F(p, n) = F(n, n)$, если расстояние между этими нуклонами одно и то же.

Название частицы	Название взаимодействия		
	Гравитационное	Электромагнитное	Ядерное (сильное)
фотон	+	+	
электрон	+	+	
протон	+	+	+
нейтрон	+		+

Опыты показывают, что с увеличением массового числа радиус ядра увеличивается примерно пропорционально кубическому корню из массового числа. В левом столбце приведена эмпирическая формула для расчета среднего радиуса ядра.

Из нее вытекает замечательное следствие: плотность ядерного вещества постоянна и одинакова для всех ядер. Это связано с тем, что объем ядра пропорционален кубу радиуса, то есть массовому числу.

Простые подсчеты позволяют оценить эту плотность. Она имеет огромное значение, превосходя плотность воды в двести пятьдесят триллионов раз!

Так как ядра большинства существующих в природе атомов стабильны, то это означает, что протоны и нейтроны внутри ядра удерживаются какими-то силами.

Очевидно, что эти силы не могут иметь гравитационную или электромагнитную природу.

Первую — потому, что гравитационные силы очень слабы. Вторую — потому, что нейтроны электрически нейтральны, а между протонами (одноименно заряженными частицами) действуют силы отталкивания. Следовательно, нужно предположить, что ядерные силы, то есть силы, действующие между частицами внутри ядра, значительно (примерно в 100 раз) превосходят силы электромагнитной природы на расстояниях порядка размера ядра.

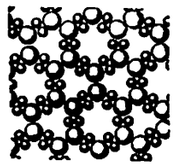
Поэтому взаимодействие протонов и нейтронов внутри ядра получило название **сильного взаимодействия.**

Другая важная особенность ядерных сил состоит в их **короткодействии.** Эти силы очень быстро уменьшаются при увеличении расстояния между частицами. На расстоянии, большем 10^{-12} см (размер ядра урана), эти силы быстро убывают практически до нуля.

Внутри ядра силы ядерного взаимодействия между двумя протонами, двумя нейтронами или протоном и нейтроном, как было установлено в специальных опытах, равны. Это говорит о том, что ядерные силы не «чувствительны» к наличию или отсутствию у частицы электрического заряда.

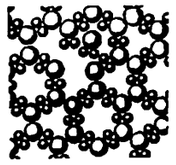
Этот факт получил название **зарядовой независимости** ядерных сил. Поэтому с точки зрения ядерного взаимодействия протон и нейтрон — одинаковые частицы. Чтобы подчеркнуть этот факт, их часто называют **нуклонами.**

§ 12. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ



Лед

0,06 эВ

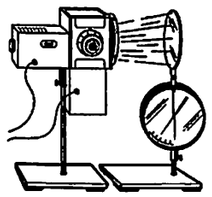


Чтобы расплавить 1 кг льда при температуре плавления нужно затратить 332 кДж энергии, что в расчете на одну молекулу составляет 0, 06 эВ

Вода

0,4 эВ

Чтобы испарить 1 кг воды при температуре кипения нужно затратить 2,3 МДж энергии, что в расчете на одну молекулу составляет 0, 4 эВ

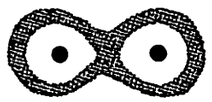


Натрий

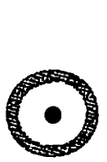
2,3 эВ

Чтобы вырвать электрон с поверхности натрия нужно затратить 2,3 эВ энергии

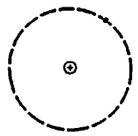
Молекула водорода



4,5 эВ



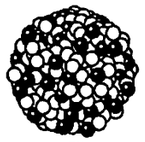
Чтобы «разорвать» молекулу водорода на атомы надо затратить 4, 5 эВ энергии



Атом водорода

13,6 эВ

Чтобы ионизировать атом водорода надо затратить 13,6 эВ энергии



Ядро урана-238

7,5 МэВ!

Чтобы «вырвать» один нуклон из ядра урана-238 надо затратить 7, 5 МэВ энергии

Нуклоны внутри атомного ядра удерживаются ядерными силами. Чтобы отделить от ядра один или несколько нуклонов, или чтобы «разрушить» ядро, «разобрав» его на отдельные нуклоны, необходимо затратить некоторую энергию.

В этом факте нет ничего удивительного, ведь при изучении различных явлений мы сталкивались с подобным феноменом неоднократно.

Например, молекулы в твердом теле или в жидкости удерживаются силами молекулярного взаимодействия на расстояниях, сравнимых с размерами самих молекул. Электроны внутри металла удерживаются силами взаимодействия с ионами кристаллической решетки. Электрон внутри атома — силами притяжения к ядру атома и т.п.

Чтобы расплавить твердое тело, испарить жидкость, «вырвать» электрон из металла или ионизировать атом, нужно затратить энергию или совершить работу.

В каждом из перечисленных случаев эта работа, отнесенная к единице массы или к одиночной частице (иначе говоря, **удельная энергия**) имеет вполне определенное значение. Она зависит от вида процесса и рода вещества. И называют эту величину в каждом случае по-своему. Но ее физический смысл во всех случаях один и тот же. (Чтобы вы имели возможность припомнить соответствующие названия величин и их характерные значения для некоторых веществ, мы приводим известные вам сведения в левом столбце параграфа.)

В случае атомного ядра эта величина носит название **энергии связи атомного ядра.**

Энергия связи — это энергия, которую нужно затратить, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны.

Энергия, которую надо затратить, чтобы отделить от ядра один нуклон (неважно какой — нейтрон или протон, ведь ядерные силы зарядовонезависимы), называется **удельной энергией связи ядра.**

Обратите внимание на числовые значения величин, приведенных в левом столбце: по мере перехода от твердого тела к жидкости, от жидкости к пару, от молекулы к атому, от атома к электрону значение удельной энергии соответствующей связи возрастает. Это говорит о том, что при пе-

$$W = mc^2$$

Энергетический эквивалент 1а.е.м.:

1 а.е.м. $= 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ кг;

$$W = 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot \left(3 \cdot 10^8\right)^2 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж};$$

$$W = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-10}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 931 \text{ МэВ}.$$

$$1 \text{ а.е.м.} \rightarrow 931 \text{ МэВ}$$

${}^{A}_{Z}X$; Z – число протонов;

$N = A - Z$ – число нейтронов;

$Zm_p + Nm_n$ – сумма масс нуклонов в ядре;

$m_{ядра}$ – точно измеренная масса ядра;

$$m_{ядра} < Zm_p + Nm_n;$$

$\Delta m = \left(Zm_p + Nm_n - m_{ядра}\right)$ – дефект массы;

$W_{св} = \Delta mc^2$ – энергия связи ядра.

Ядро дейтерия, ${}^{2}_{1}H$

$Z = 1$; $Zm_p = 1 \cdot 1{,}0078$ а.е.м. $= 1{,}0078$ а.е.м.

$N = 1$; $Nm_n = 1 \cdot 1{,}0087$ а.е.м. $= 1{,}0087$ а.е.м.

$Zm_p + Nm_n = 2{,}0165$ а.е.м.

$m_{ядра} = 2{,}0141$ а.е.м.

$m_{ядра} < Zm_p + Nm_n$;

$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{ядра} = 0{,}0024$ а.е.м.

$W_{св} = \Delta mc^2 = 0{,}0024$ а.е.м. $\cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$

$W_{св} \approx 2{,}23$ МэВ;

Ядро углерода, ${}^{12}_{6}C$

$Z = 6$; $N = 12 - 6 = 6$;

$Zm_p = 6 \cdot 1{,}0078$ а.е.м. $= 6{,}0468$ а.е.м.

$Nm_n = 6 \cdot 1{,}0087$ а.е.м. $= 6{,}0522$ а.е.м.

$Zm_p + Nm_n = 12{,}0990$ а.е.м.

$m_{ядра} = 12{,}0000$ а.е.м.

$m_{ядра} < Zm_p + Nm_n$;

$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{ядра} = 0{,}0990$ а.е.м.

$W_{св} = \Delta mc^2 = 0{,}0990$ а.е.м. $\cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$

$W_{св} \approx 92{,}17$ МэВ;

реходе от макроскопических тел к микроскопическим объектам мы получаем все более прочные образования. Например, атом прочнее молекулы, а ядро — прочнее атома.

Энергия связи различных атомных ядер огромна. Ее можно подсчитать для каждого атомного ядра, если точно измерить его массу и сравнить ее с суммарной массой составляющих это ядро нуклонов.

Точные опыты показали, что **масса атомного ядра всегда меньше суммы масс нейтронов и протонов, входящих в его состав.**

Этот факт удивителен, но его вполне можно объяснить! Действительно, если воспользоваться законом сохранения энергии, можно утверждать, что энергия, которую нужно затратить, чтобы разделить ядро на нуклоны, равна энергии, которая выделяется, когда из отдельных нуклонов образуется данное ядро. (Так, при отвердевании 1 кг жидкости выделяется такое же количество теплоты, которое ранее потребовалось, чтобы 1 кг твердого вещества расплавить при температуре плавления.)

А раз энергия выделяется, то в соответствии с уравнением Эйнштейна, устанавливающем эквивалентность массы и энергии, масса образовавшегося из нуклонов ядра должна оказаться несколько меньше. Говорят, что при образовании ядра образуется «дефект массы»: разность между суммарной массой нуклонов и массой образовавшегося из них ядра всегда положительное число. Его-то и можно подсчитать.

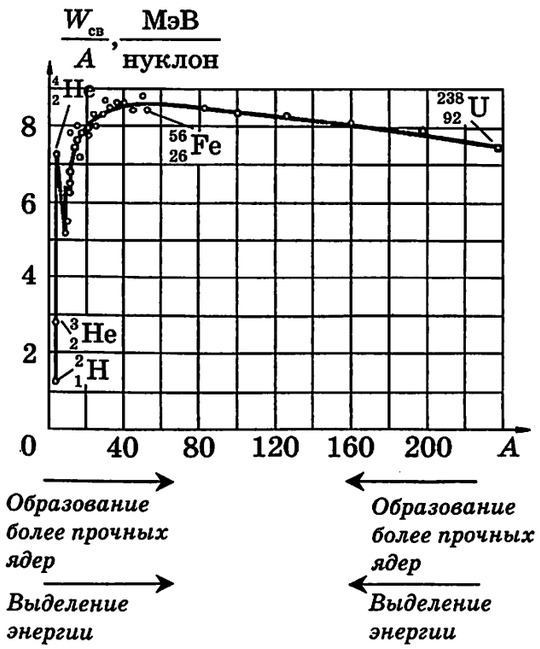
Умножая дефект массы на квадрат скорости света, получим эквивалентное значение энергии. Именно такая энергия выделяется, когда образуется данное ядро.

Для примера мы приводим расчет дефекта массы и соответствующей ему энергии (с точностью до знака равной энергии связи) для некоторых ядер.

Эта энергия выделяется при образовании ядра в виде гамма-квантов, так как ядерные силы сообщают протонам огромные ускорения к центру ядер.

Значения этой энергии трудно себе представить, так они велики. Можно для сравнения привести такой пример. При образовании из нейтронов и протонов ядер гелия, массой всего 4 г, выделяется примерно столько же энергии, сколько ее выделяется при сгорании 1,5 ... 2 вагонов каменного угля!

Название химического элемента	Символ изотопа	Энергия связи, МэВ	Удельная энергия связи, МэВ/нукл
Водород	${}^{1}_{1}H$	—	—
	${}^{2}_{1}H$	2,2	1,1
	${}^{3}_{1}H$	8,5	2,8
Гелий	${}^{4}_{2}He$	28,3	7,1
Литий	${}^{7}_{3}Li$	39,2	5,6
Бериллий	${}^{8}_{4}Be$	56,5	7,1
Бор	${}^{10}_{5}B$	65,0	6,5
Углерод	${}^{12}_{6}C$	92,2	7,7
Азот	${}^{14}_{7}N$	104,6	7,4
Кислород	${}^{16}_{8}O$	127,6	7,9
Кальций	${}^{40}_{20}Ca$	342,0	8,5
Железо	${}^{56}_{26}Fe$	492,3	8,8
Никель	${}^{62}_{28}Ni$	545,3	8,8
Криптон	${}^{82}_{36}Kr$	714,3	8,7
Платина	${}^{196}_{78}Pt$	1553,6	7,9
Уран	${}^{238}_{92}U$	1801,7	7,6
Менделевий	${}^{255}_{101}Md$	1894,9	7,4



Очевидно, что чем больше нуклонов входит в состав ядра атома, то есть чем больше его массовое число, тем больше энергия связи ядра.

Однако, чтобы судить о прочности ядра, следует найти удельную энергию связи, то есть узнать, какую энергию придется затратить, чтобы отделить от ядра один нуклон. Для этого нужно просто разделить энергию связи ядра на его массовое число.

Вот тут-то нас и ожидают удивительные открытия! Оказывается, что у ядер с малым массовым числом удельная энергия связи сравнительно мала и по мере увеличения массового числа постепенно увеличивается, достигая некоторого слабо выраженного максимума (или насыщения) у ядер средней части периодической системы. Этот максимум равен примерно 8,5 ... 8,6 Мэв/нуклон у ядер с $A = 50 \ldots 60$ (железо и близкие к нему элементы).

Далее энергия связи начинает постепенно уменьшаться, достигая у ядер урана примерно 7,5 МэВ/нуклон. Это означает, что ядра урана (и ядра других элементов, находящихся в конце периодической системы) менее прочные, чем ядра элементов, расположенных в середине периодической системы. Их разрушить проще!

Если нанести значения удельной энергии связи различных ядер, то получим диаграмму **зависимости удельной энергии связи от массового числа.** (Это не график зависимости, а именно диаграмма, так как массовое число может принимать только целочисленные значения. Соединять между собой полученные точки, вообще говоря, некорректно. Это делается только для того, чтобы обнаружить тенденции в изменении удельной энергии связи при переходе к ядрам с большими массовыми числами.)

Зная строение ядра, можно объяснить наблюдаемую на диаграмме тенденцию. По мере продвижения к концу периодической системы увеличивается число протонов в составе ядра, а значит, возрастают и силы отталкивания между ними. Хотя они и не могут преодолеть силы ядерного взаимодействия, но ослабить их могут, что и наблюдается на практике.

Изучая эту диаграмму, можно также **предсказать,** что превращения ядер могут сопровождаться как выделением энергии (когда образуются более прочные ядра), так и поглощением энергии. Рассмотрим эти процессы подробно в следующем параграфе.

§ 13. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Естественное превращение атомных ядер происходит в явлении радиоактивного распада, когда из ядра выбрасывается альфа-частица или бета-частица, и образуется ядро другого химического элемента.

Так как нейтроны и протоны, составляющие ядро — микрочастицы, то энергия ядра, как и энергия атома, может принимать только определенные значения. Наименьшей энергией из возможных значений ядро обладает, когда находится **в основном**, невозбужденном состоянии, все остальные состояния ядра — возбужденные.

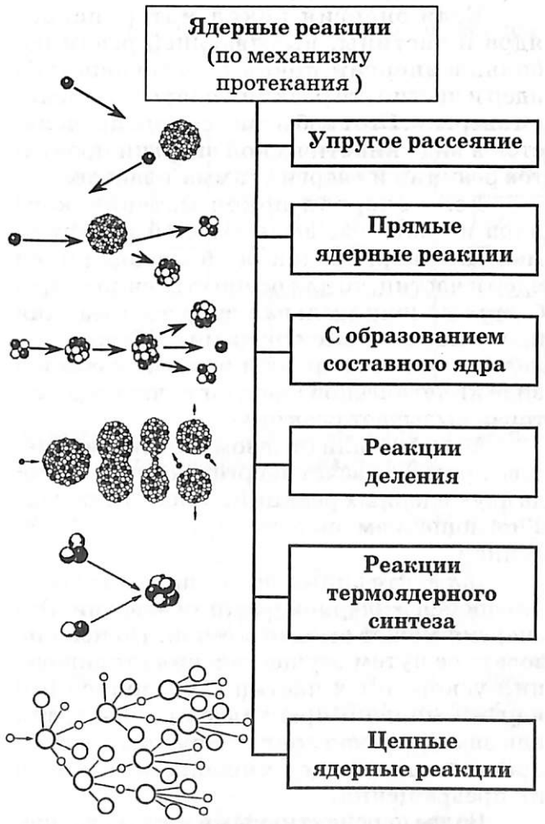
Образовавшееся при радиоактивном распаде ядро обычно находится в возбужденном состоянии. Спустя небольшой промежуток времени, оно переходит в основное, невозбужденное состояние, испуская гамма-кванты. (Этот процесс аналогичен тому, что происходит с возбужденным атомом.) Переход из возбужденного состояния в основное может происходить разными способами, поэтому в радиоактивном распаде обычно наблюдаются гамма-кванты разных энергий.

Мы уже говорили о том, что Резерфорд предположил возможность искусственного превращения атомных ядер, если «бомбардировать» их альфа-частицами. Он же наблюдал и первую ядерную реакцию, в которой альфа-частица вызвала превращение ядра азота.

С тех пор **ядерные реакции**, то есть изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или другими атомными ядрами, стали важным инструментом в исследовании ядер.

С их помощью получают всевозможные радиоактивные изотопы, которые в природе не найдены. Ядерные реакции используют для превращения внутреннюю энергию ядер в электрическую на атомных электростанциях. Ядерные реакции происходят и в самом разрушительном оружии, которое когда-либо было создано человеком, в атомной и водородной бомбах.

Рассмотрим ядерные реакции более подробно. Будем называть ядра, которые собираемся превратить в другие — материнскими. В качестве материнских можно использовать ядра любых химических элементов, но чаще всего — это стабильные



$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n$$

или

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}(\alpha, n)^{30}_{15}\mathrm{P}$$

ядра. (Конечно, для проведения ядерных реакций используют атомы соотвествующих химических элементов. Наличие электронов в атоме практически не оказывает влияния на протекание ядерных процессов.)

В качестве «снарядов», вызывающих ядерные реакции, используются тяжелые частицы (протоны, дейтроны, нейтроны, альфа-частицы, ядра других атомов, предварительно разогнанные до больших скоростей при помощи специальных ускорителей). Чтобы вызвать ядерную реакцию частица должна приблизиться к материнскому ядру на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил, то есть на расстояние 10^{-13} см.

Все перечисленные частицы, кроме нейтрона, имеют, как и материнское ядро, положительный заряд. Следовательно, чтобы ядерное превращение произошло, эти частицы должны обладать значительной скоростью — ведь по мере приближения к ядру частица испытывает все возрастающие силы кулоновского отталкивания. Говорят: положительно заряженная частица должна преодолеть кулоновский барьер.

Чем больше заряд материнского ядра, тем (при прочих равных условиях) больше должна быть энергия частицы, чтобы вызвать его ядерное превращение.

Нейтрон не имеет электрического заряда, поэтому имеет возможность приблизиться к ядру, даже если его скорость мала (тепловые нейтроны). Более того, нейтроны, движущиеся с большими скоростями, реже вызывают превращения ядер, чем медленные. Они пролетают мимо ядра, не успевая быть захваченными ядром. Поэтому в некоторых случаях, чтобы увеличить вероятность захвата нейтрона ядром, скорость нейтронов специально уменьшают.

Результатом ядерной реакции является образование одного (реже нескольких) дочерних ядер и какой-либо частицы. Все ядерные реакции сопровождаются выделением гамма-лучей, так как дочерние ядра обычно находятся в возбужденных состояниях.

Чтобы записать уравнение ядерной реакции, нужно воспользоваться законом сохранения электрического заряда и законом сохранения массового числа (в ядерных реакциях сохраняется число нуклонов).

В качестве примера мы приводим два способа записи ядерной реакции, принятые в ядерной физике.

Энергетический выход реакции:

$^{A1}_{Z1}\mathrm{X}+^{A2}_{Z2}\mathrm{Y}\to^{A3}_{Z3}\mathrm{T}+^{A4}_{Z4}\mathrm{D}$;

$W_{\mathrm{I}}=m_{\mathrm{X+Y}}c^2$ – масса покоя ядер, вступивших в реакцию,

$W_{\mathrm{II}}=m_{\mathrm{T+D}}c^2$ – масса покоя ядер, образовавшихся в реакции,

1. $W_{\mathrm{I}}>W_{\mathrm{II}}$ – происходит выделение энергии,

2. $W_{\mathrm{I}}<W_{\mathrm{II}}$ – происходит поглощение энергии.

Пример 1.

$^{9}_{4}\mathrm{Be}+^{2}_{1}\mathrm{H}\to^{10}_{5}\mathrm{B}+^{1}_{0}n$;

Чтобы преодолеть кулоновский барьер дейтрон должен обладать кинетической энергией

$m\left(^{9}_{4}\mathrm{Be}\right)=9{,}0122$ а.е.м.

$m\left(^{2}_{1}\mathrm{H}\right)=2{,}0141$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}=11{,}0263$ а.е.м.

$m\left(^{10}_{5}\mathrm{B}\right)=10{,}0129$ а.е.м.

$m\left(^{1}_{0}n\right)=1{,}0087$ а.е.м.

$m_{\mathrm{II}}=11{,}0216$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}>m_{\mathrm{II}}$, значит, энергия выделяется.

$\Delta W=\Delta mc^2=\left(m_{\mathrm{II}}-m_{\mathrm{I}}\right)c^2<0$,

$|\Delta W|=|-0{,}0047\cdot 931|$ а.е.м. $\cdot\dfrac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}\approx 4{,}4$ МэВ.

Энергетический выход реакции составляет примерно 4,4 МэВ.

Пример 2.

$^{14}_{7}\mathrm{N}+^{4}_{2}\mathrm{He}\to^{17}_{8}\mathrm{O}+^{1}_{1}p$;

$m\left(^{14}_{7}\mathrm{N}\right)=14{,}0031$ а.е.м.

$m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right)=4{,}0026$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}=18{,}0057$ а.е.м.

$m\left(^{17}_{8}\mathrm{O}\right)=16{,}9991$ а.е.м.

$m\left(^{1}_{1}p\right)=1{,}0078$ а.е.м.

$m_{\mathrm{II}}=18{,}0069$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}<m_{\mathrm{II}}$, значит, энергия поглощается.

$\Delta W=\Delta mc^2=\left(m_{\mathrm{II}}-m_{\mathrm{I}}\right)c^2>0$,

$\Delta W=0{,}0012\cdot 931$ а.е.м. $\cdot\dfrac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}\approx 1{,}1$ МэВ.

Для осуществления реакции нужно, чтобы α-частицы обладали энергией $W_{\alpha}\geq 1{,}1$ МэВ.

Если известно, какая частица вызвала ядерное превращение данного материнского ядра и какая частица образовалась в результате реакции, то можно однозначно определить дочернее ядро.

В результате ядерной реакции могут образовываться продукты, удельная энергия связи которых больше или меньше удельной энергии связи материнского ядра. Таким образом, ядерные реакции всегда сопровождаются выделением или поглощением энергии. Количество энергии, которое выделяется (или поглощается) в реакции, называется **энергетическим выходом реакции**. Его можно подсчитать, пользуясь законом сохранения энергии.

Для этого нужно подсчитать энергию покоя ядер и частиц до реакции и после нее и сравнить их между собой.

Если энергия покоя материнского ядра и частицы, вызывающей реакцию, больше энергии покоя образовавшихся ядер и частиц, то реакция идет с выделением энергии. Этот избыток энергии проявляется в виде кинетической энергии продуктов реакции и энергии гамма-квантов.

Если энергия покоя материнского ядра и частицы, вызывающей реакцию, меньше энергии покоя образовавшихся ядер и частиц, то для осуществления ее требуется дополнительная энергия (реакция идет с поглощением энергии). Обычно, эту недостающую энергию приносит с собой в виде кинетической энергии та частица, которая вызывает реакцию.

Мы показали (в левом столбце) в качестве примера расчет энергетического выхода двух ядерных реакций. Одна из них идет с поглощением энергии, другая — с выделением.

Обратите внимание на значение выделяющейся в ядерной реакции энергии. Эта энергия может быть огромной. Но использовать ее путем осуществления столкновений ускоренных частиц с материнскими ядрами мишени практически нельзя, так как значительная доля ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая их превращения.

Более перспективными в этом отношении оказываются нейтроны. Первым изучать реакции, вызываемые нейтронами, начал итальянский физик Э. Ферми. Он выяснил, что медленные нейтроны являются гораздо более эффективными, чем быстрые, и предложил способ замедления нейтронов до тепловых скоростей. Для этого используется обычная вода. В ней содержится большое число ядер водорода — протонов, масса которых примерно равна массе нейтрона. При столкновении частиц одинаковой массы происходит наиболее интенсивная передача кинетической энергии от одной частицы другой. Так как молекулы воды двигаются с тепловыми скоростями, то столкновение их с нейтронами приводит к уменьшению скорости нейтронов. Если же происходит лобовое столкновение нейтрона с покоящимся протоном, то нейтрон целиком передает свою энергию протону.

Пример 3.

$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{1}_{0}n\to^{24}_{11}\mathrm{Na}+^{4}_{2}\mathrm{He}$;

Эту реакцию может вызвать «тепловой» нейтрон

$m\left(^{27}_{13}\mathrm{Al}\right)=26{,}9815$ а.е.м.

$m\left(^{1}_{0}n\right)=1{,}0087$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}=27{,}9902$ а.е.м.

$m\left(^{24}_{11}\mathrm{Na}\right)=23{,}9850$ а.е.м.

$m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right)=4{,}0026$ а.е.м.

$m_{\mathrm{II}}=27{,}9876$ а.е.м.

$m_{\mathrm{I}}>m_{\mathrm{II}}$, значит, энергия выделяется.

$\Delta W=\Delta mc^2=\left(m_{\mathrm{II}}-m_{\mathrm{I}}\right)c^2<0$,

$|\Delta W|=|-0{,}0026\cdot 931|$ а.е.м. $\cdot\dfrac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}\approx 2{,}4$ МэВ.

Энергетический выход реакции составляет примерно 2,4 МэВ.

Название элемента	Z	A	Период полураспада	Год синтеза
Технеций	43	97	$2{,}6\cdot 10^6$ лет	1937
Прометий	61	145	18 лет	1947
Астат	85	210	8,3 ч	1940
Франций	87	223	21 мин	1939

Реакции, в которых впервые были получены эти химические элементы

Технеций:

$^{92}_{42}\mathrm{Mo}+^{2}_{1}\mathrm{H}\to^{92}_{43}\mathrm{Tc}+^{1}_{0}n+^{1}_{0}n$;

$^{98}_{42}\mathrm{Mo}+^{2}_{1}\mathrm{H}\to^{99}_{43}\mathrm{Tc}+^{1}_{0}n$;

$^{99}_{44}\mathrm{Ru}+^{1}_{0}n\to^{99}_{43}\mathrm{Tc}+^{1}_{1}\mathrm{H}$.

Прометий: впервые был выделен из продуктов деления урана-235 в ядерных реакторах.

$^{145}_{59}\mathrm{Pr}+^{4}_{2}\mathrm{He}\to^{147}_{61}\mathrm{Pm}+^{1}_{0}n+^{1}_{0}n$;

Астат:

$^{209}_{83}\mathrm{Bi}+^{4}_{2}\mathrm{He}\to^{211}_{85}\mathrm{At}+^{1}_{0}n+^{1}_{0}n$;

$^{197}_{79}\mathrm{Au}+^{12}_{6}\mathrm{C}\to^{206}_{85}\mathrm{At}+^{1}_{0}n+^{1}_{0}n+^{1}_{0}n$.

Франций: впервые был выделен из продуктов распада актиния.

$^{227}_{89}\mathrm{Ac}\to^{223}_{87}\mathrm{Fr}+^{4}_{2}\mathrm{He}$.

С помощью ядерных реакций ученые смогли получить радиоактивные изотопы всех химических элементов, которые встречаются в природе только в стабильном состоянии.

В периодической системе Менделеева некоторые клетки долгое время вообще пустовали: химические элементы, которые должны были бы занимать их, не найдены в природе, так как не имеют стабильных изотопов. А вот радиоактивные изотопы у этих элементов (их номера 43, 61, 85 и 87) имеются. Все они были получены искусственно. Самый долгоживущий из них — изотоп технеция-97 — имеет период полураспада около 2,6 млн. лет.

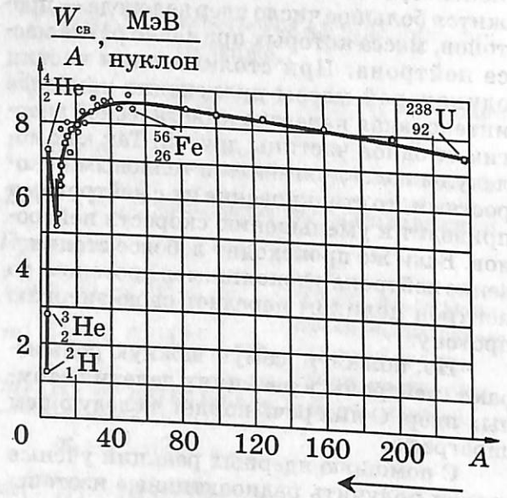
С помощью ядерных реакций были получены также трансурановые элементы (то есть элементы следующие в периодической системе за ураном).

Среди них очень важные для ядерной энергетики элементы нептуний и плутоний, которые сегодня производятся в промышленных масштабах.

Другие трансурановые элементы: америций ($Z=95$), кюрий ($Z=96$), берклий ($Z=97$), калифорний ($Z=98$), эйнштейний ($Z=99$), фермий ($Z=100$), менделевий ($Z=101$), нобелий ($Z=102$), лоуренсий ($Z=103$), резерфордий ($Z=104$), дубний ($Z=105$), сиборгий ($Z=106$), борий ($Z=107$), гассий ($Z=108$), мейтнерий ($Z=109$), а также элементы с $Z=110\ldots 118$, пока не имеющие общепризнанных названий.

Элементы, начиная со 104, были синтезированы либо в нашей стране, в ее ядерной столице городе Дубне, либо в Германии.

§ 14. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ



Образование более прочных ядер

Выделение энергии

Деление ядер урана было открыто в 1938 году немецкими физиками О. Ганом и Ф. Штрассманом. Проводя опыты по бомбардировке урана нейтронами, они обнаружили в облучаемых образцах элементы средней части периодической системы: барий, криптон, цезий, рубидий и др.

Обоснование этому факту было дано в начале 1939 года английским физиком О. Фришем и австрийским физиком Л. Мейтнер. Они высказали предположение о том, что ядро урана, «захватив» нейтрон, становится неустойчивым и делится на два «осколка» примерно одинаковой массы. Такое деление ядра вполне допустимо с точки зрения закона сохранения энергии: ведь в результате образуются более прочные ядра, то есть и более устойчивая система.

Кроме того, реакция деления сопровождается выделением энергии, так как сумма масс покоя образовавшихся ядер, меньше массы покоя ядра урана.

Возможность деления тяжелых ядер можно было бы предсказать при помощи диаграммы зависимости удельной энергии связи от массового числа. Из диаграммы видно, что удельная энергия связи ядра урана примерно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи ядер, находящихся в средней части периодической системы. Таким образом, реакции деления оказываются энергетически выгодными.

Можно примерно оценить энергетический выход таких реакций. Так как на каждый нуклон, участвующий в реакции деления, приходится около 1 МэВ выделившейся энергии, а полное число нуклонов около 200, то энергетический выход от деления каждого ядра урана составит около 200 МэВ! Сегодня известно, что ни в какой другой ядерной реакции, не связанной с делением, такого большого количества энергии не выделяется.

Для примера мы привели расчет энергетического выхода одного из вариантов деления ядра урана-235 и фотографию, полученную в камере Вильсона. Расчет полностью подтверждает наши предположения, а на фотографии можно увидеть треки, оставленные осколками, образовавшимися при делении ядра урана и разлетающимися в противоположные стороны.

Большая часть энергии, выделяющейся при делении ядер, приходится на кинетическую энергию осколков. Другая ее часть — это энергия гамма-квантов, сопровождающих процесс деления ядер.

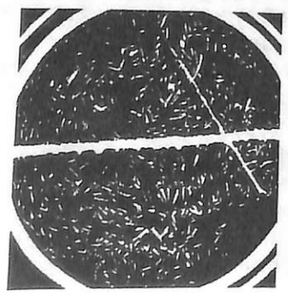
$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^1_0n;$$

1. $W_{св}\left(^{235}_{92}\mathrm{U}\right) \approx 1708$ МэВ;

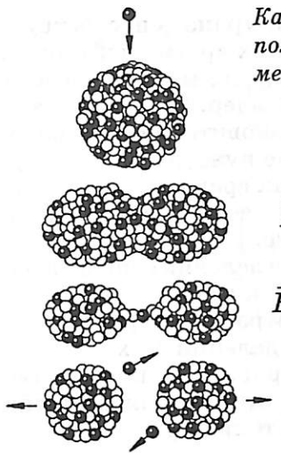
2. $W_{св}\left(^{140}_{54}\mathrm{Xe}\right) \approx 140 \cdot 8{,}5 \dfrac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}} \approx 1190$ МэВ;

   $W_{св}\left(^{94}_{38}\mathrm{Sr}\right) \approx 94 \cdot 8{,}5 \dfrac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}} \approx 799$ МэВ;

3. $\Delta W \approx (1190 + 799 - 1708)$ МэВ ≈ 280 МэВ;



Осколки, образовавшиеся при делении ядра урана разлетаются от места, где они образовались, в противоположные стороны



Капельная модель ядра помогает предложить механизм деления ядра

$\vec{F}_{яд} \downarrow\uparrow \vec{F}_к$; $F_{яд} \sim F_к$;

$\vec{F}_{яд} \downarrow\uparrow \vec{F}_к$; $F_{яд} < F_к$;

$\vec{F}_{яд} \downarrow\uparrow \vec{F}_к$; $F_{яд} \ll F_к$;

Силы кулоновского отталкивания сообщают осколкам огромные скорости

Название химического элемента	Заряд ядра, Z	Число нейтронов, N	$\frac{N}{Z}$
Водород	1	0	0
Гелий	2	2	1
Бериллий	4	5	1,25
Азот	7	7	1
Кислород	8	8	1
Кальций	20	20	1
Железо	26	30	1,15
Никель	28	31	1,11
Криптон	36	48	1,33
Рубидий	37	48	1,30
Стронций	38	50	1,32
Ксенон	54	77	1,43
Цезий	55	78	1,42
Барий	56	81	1,45
Свинец	82	125	1,52
Уран	92	146	1,59

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^1_0n;$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^1_0n;$$

$^{144}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba}$

$^{89}_{36}\mathrm{Kr} \rightarrow {}^{84}_{36}\mathrm{Kr}$

$^{140}_{54}\mathrm{Xe} \rightarrow {}^{131}_{54}\mathrm{Xe}$

$^{94}_{38}\mathrm{Sr} \rightarrow {}^{88}_{38}\mathrm{Sr}$

В процессе деления ядер урана образуются нейтронноизбыточные, нестабильные ядра (сильно радиоактивные)

Реакции деления могут происходить только с тяжелыми ядрами. Для того, чтобы объяснить механизм деления, можно воспользоваться **капельной моделью ядра**.

Ядро урана состоит из большого числа частиц (более 200), поэтому оно, вероятно, имеет сферическую форму. Между нуклонами в ядре действуют ядерные силы, имеющие характер притяжения, и силы кулоновского отталкивания между протонами. Равновесие этих противоположных тенденций (удержать частицы внутри ядра и «разлететься» в разные стороны) поддерживается в пределах области, имеющей размер атомного ядра (примерно 10^{-12} см).

Когда в ядро урана попадает нейтрон, это хрупкое равновесие нарушается. Так как расстояние между двумя группами нуклонов увеличивается, то ядерные силы уменьшаются и ядро «разваливается» на две части.

Возможно, при проверке записи уравнения ядерной реакции деления вы обратили внимание на тот факт, что в этой реакции, кроме осколков, образуется несколько нейтронов.

С одной стороны, этот факт вполне ожидаемый. Действительно, чем больше заряд ядра, тем большее количество нейтронов входит в его состав, чтобы скомпенсировать возрастающее кулоновское отталкивание протонов. Если вы внимательно проанализируете сведения, приведенные в таблице из левого столбца, то обнаружите, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных изотопах возрастает с повышением атомного номера.

Поэтому при реакции деления всегда образуются несколько нейтронов. Их кинетическая энергия может меняться в широких пределах: от нескольких миллионов электронвольт до очень близких к нулю.

Кроме того, образовавшиеся осколки содержат избыточное количество нейтронов и оказываются сильно радиоактивными. Они испытывают последовательные бета-распады и превращаются, в конце концов, в стабильные изотопы.

С другой стороны, выделение нейтронов в реакциях деления является фундаментальным фактом. Именно благодаря ему возможно практическое использование внутриядерной энергии: один нейтрон, вы-

Число ядер, содержащихся в 1 г урана-235:

$$n = \frac{m}{m_0} = \frac{10^{-3}\ \text{кг}}{235 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{кг}} \approx 2{,}6 \cdot 10^{21};$$

Значение энергии, выделяющейся при делении этого числа ядер урана-235:

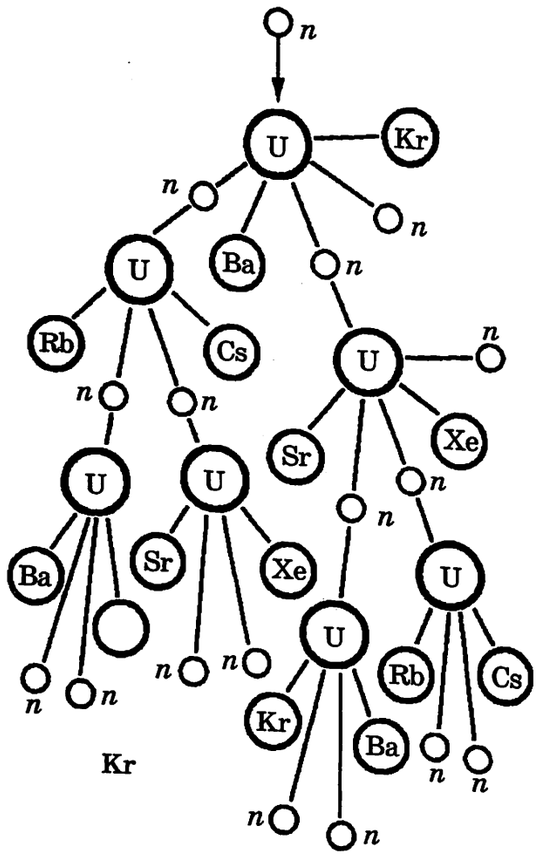
$$W = \Delta W_{\text{св}} \cdot n \approx 2{,}6 \cdot 10^{21} \cdot 200 \approx 5 \cdot 10^{23}\ (\text{МэВ});$$

$$W = 5 \cdot 10^{23} \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж} \approx 8 \cdot 10^{10}\ \text{Дж};$$

Масса нефти, при полном сгорании которой выделится такое же количество энергии:

$$q = 32 \cdot 10^6\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$m_{\text{топлива}} = \frac{W}{q} = \frac{8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 10^6}\ \text{кг} = 2{,}5 \cdot 10^3\ \text{кг}.$$



Коэффициент размножения нейтронов

$$k = \frac{N_{i\text{-го поколения}}}{N_{(i-1)\text{-го поколения}}}$$

зывая деление ядра урана, способствует появлению нескольких других нейтронов, которые, в свою очередь, могут вызывать деление следующих ядер. Таким образом реакция деления становится **цепной ядерной реакцией:** она не нуждается в поддержании извне, так как среди продуктов реакции оказываются частицы (нейтроны), которые вызывают ее.

Цепная реакция деления сопровождается выделением огромного количества энергии. Мы привели расчет энергии, которая выделяется при делении всех ядер, содержащихся в 1г урана. Это количество эквивалентно энергии, выделяемой при полном сгорании 2,5 тонн нефти или 3 тонн каменного угля.

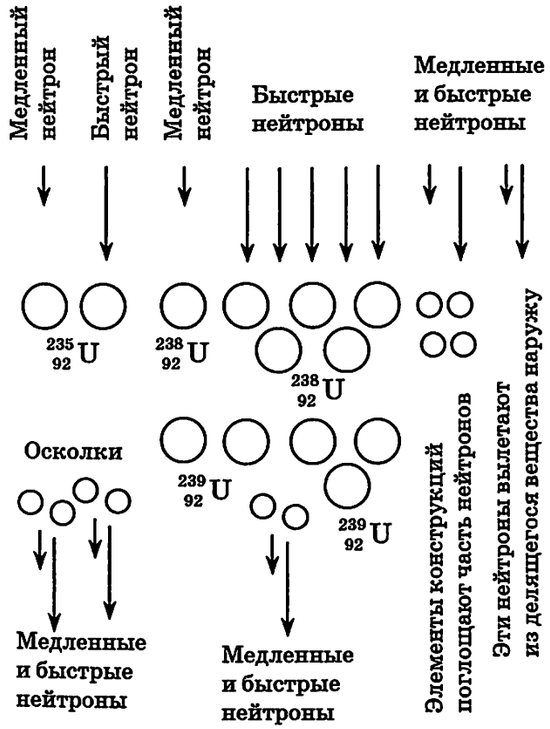
Но для осуществления цепной реакции из всех ядер, существующих на Земле, пригодны только ядра урана-235. А на его долю приходится примерно 1/140 доля природной смеси изотопов урана-238 и урана-235. Таким образом, в природе имеется значительное количество ядер урана-238.

Они, как показали исследования, тоже могут делиться, но в отличие от ядер урана-235, которые делятся всякий раз, захватив нейтрон любой энергии, ядра урана-238 делятся только под действием нейтронов, имеющих энергию более 1 МэВ.

Кроме того, только одно из 5 ядер урана-238, захватив быстрый нейтрон, делится. Остальные четыре превращаются в изотоп урана-239. По этим причинам цепная реакция деления с использованием чистого урана-238 невозможна. Природный уран необходимо обогащать изотопом урана-235.

Мы выяснили, таким образом, что значительная часть нейтронов, образующихся в реакции деления, не вызывают деления следующих ядер урана. Однако, для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон вызывал деление, нужно лишь обеспечить, чтобы среднее число нейтронов, освобожденных при делении ядер, с течением времени в данной массе урана не уменьшалось. Или как говорят в ядерной физике, нужно, чтобы **коэффициент размножения нейтронов k** был не меньше 1.

Под коэффициентом размножения нейтронов понимают отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов в предшествующем «поколении». Если $k \geq 1$, то число нейтронов со временем не уменьшается и цепная реакция идет. Если $k < 1$, то число нейтронов убывает и цепная реакция становится невозможной.



$k < 1$ — *Число нейтронов в каждом последующем поколении меньше, чем в предыдущем. Число делящихся ядер уменьшается и цепная реакция не возникает*

$1 < k < 1{,}01$ — *Число нейтронов в каждом последующем поколении примерно равно числу нейтронов в предшествующем поколении. Число делящихся ядер в среднем остается постоянным. Цепная реакция протекает стационарно.*

$k \geq 1{,}01$ — *Число нейтронов в каждом последующем поколении больше, чем в предыдущем. Число делящихся ядер увеличивается лавинообразно, происходит неуправляемая цепная реакция — взрыв.*

$$^{238}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}\text{U};$$

$$^{239}_{92}\text{U} \rightarrow ^{239}_{93}\text{Np} + ^{0}_{-1}e;$$

$$T_{1/2} = 23\ \text{мин}$$

$$^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow ^{239}_{94}\text{Pu} + ^{0}_{-1}e;$$

$$T_{1/2} \approx 2\ \text{суток}.$$

Перечислим факторы, которые влияют на значение коэффициента размножения нейтронов:

— захват быстрых и медленных нейтронов ядрами урана-235 с последующим делением этих ядер;

— захват быстрых нейтронов ядрами урана-238 с последующим делением;

— захват нейтронов ядрами урана-238 без последующего деления;

— захват нейтронов продуктами деления, замедлителем и конструктивными элементами установки;

— вылет нейтронов из делящегося вещества наружу.

Из пяти перечисленных факторов только первые два приводят к увеличению числа нейтронов. Остальные — уменьшают его.

Для стационарного течения реакции необходимо поддерживать коэффициент размножения нейтронов на уровне 1.

Строгие расчеты показывают, что уже при $k = 1{,}01$ практически мгновенно произойдет взрыв: лавинообразное выделение огромного количества энергии в ограниченной области пространства.

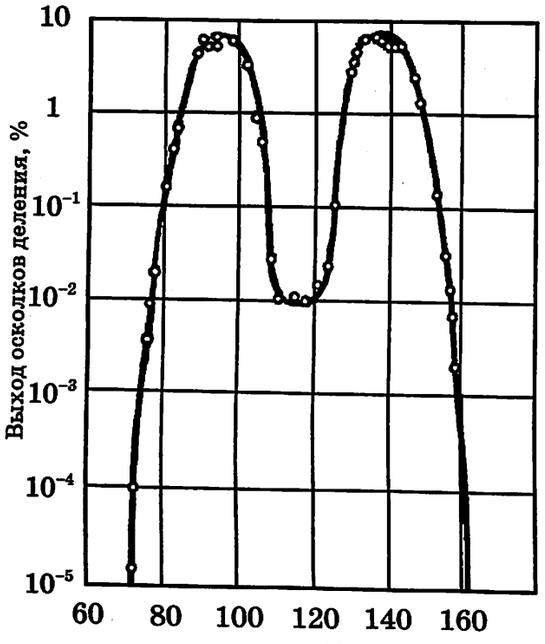
Возможно, у некоторых из вас возникли сомнения в отношении перспективности такого способа производства энергии, ведь количество ядер урана-235 очень незначительно, и природные ресурсы этого минерала не возобновляются.

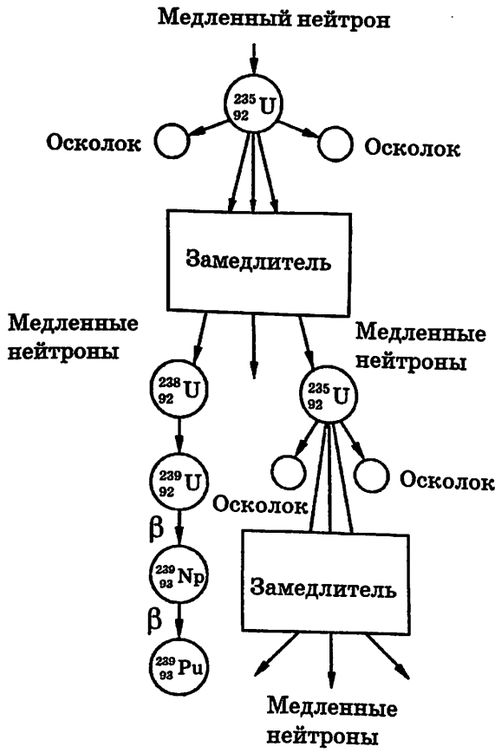
Это верно, но мы еще не рассказали об одном открытии, играющем в ядерной энергетике решающую роль. Мы записали в левом столбце уравнение реакции захвата нейтрона ядром урана-238. В результате этого захвата образуется бета-радиоактивный котороткоживущий (с периодом полураспада около 23 мин) изотоп урана-239. Испытав бета-распад он превращается в изотоп нептуния-239, который также бета-радиоактивен и с периодом полураспада около 2 дней превращается в изотоп плутония-239.

Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада составляет примерно 24000 лет. Но главное в том, что ядра плутония способны делиться под действием медленных нейтронов точно так же, как и уран-235. Это значит, что в урановом реакторе вырабатывается энергия и, одновременно, возобновляются запасы ядерного горючего!

§ 15. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Распределение осколков деления ядер урана-235 по массовому числу





Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления атомных ядер, называется ядерным реактором.

Ядерный реактор — основная часть атомной электростанции — сложное научное, инженерное и техническое устройство. Однако, каждый, кто знаком с особенностями протекания цепной ядерной реакции, может в общих чертах назвать его составные части.

Давайте порассуждаем. Допустим, мы располагаем необходимым количеством ядерного топлива — основную его часть составляют изотопы урана-235 (примерно 15%), урана-238 и плутония-239.

Ядерное топливо располагается в **активной зоне** реактора в виде вертикальных стержней, называемых **ТВЭЛами** (тепловыделяющие элементы).

Ядра урана-235 и плутония-239 делятся под действием быстрых и медленных нейтронов. Но медленные нейтроны вызывают деление ядер чаще, чем быстрые. Следовательно, желательно в активной зоне реактора иметь медленные нейтроны.

Однако, в процессе деления ядер чаще всего образуются быстрые нейтроны. Значит, нужно придумать механизм, позволяющий **замедлять быстрые нейтроны**.

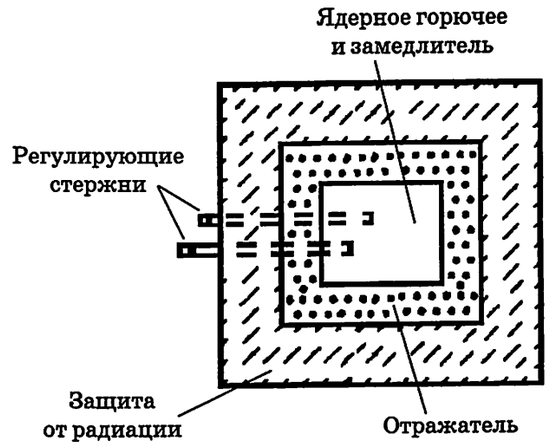
Вам известно, как это сделать наилучшим способом: нужно использовать в качестве замедлителя вещества, содержащие легкие ядра. Чаще всего в качестве замедлителя используют тяжелую или обычную воду и графит.

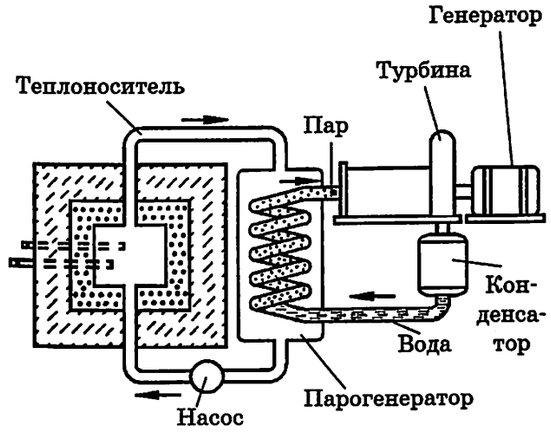
Лучшим замедлителем из них является тяжелая вода. Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Графит хорош тем, что сам нейтроны не поглощает.

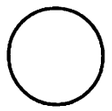
Чтобы уменьшить потери нейтронов, связанные с вылетом за пределы активной зоны, ее обычно окружают **отражателем** из бериллия — специальной оболочкой, отражающей нейтроны внутрь активной зоны.

Использование замедлителя и отражателя позволяет увеличить коэффициент размножения нейтронов.

Однако, необходимо иметь механизм, позволяющий регулировать коэффициент размножения нейтронов, чтобы обеспечить (и гарантировать!) безопасный режим работы реактора.







Число делящихся ядер пропорционально $V \sim R^3$.
Число нейтронов, вылетающих за пределы шара пропорционально $S \sim R^2$.
Увеличивая радиус шара можно получить $k = 1$.

Критическая масса

1. Наименьшая масса делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

2. Для чистого урана-235 (без замедлителя) критическая масса составляет примерно 50 кг, если уран образует шар. Радиус этого шара равен примерно 9 см.

3. Для чистого урана-235 с использованием замедлителя и бериллиевого отражателя критическая масса составляет примерно 250 г.

Такую роль могут играть вещества, охотно поглощающие нейтроны, которые можно, по мере необходимости, вводить в активную зону.

Для этого используют специальные **регулирующие стержни**, изготовленные из кадмия, карбида бора и др. По мере погружения этих стержней в активную зону увеличивается число поглощенных ими нейтронов. Больше всего нейтронов стержни поглощают, будучи полностью погруженными в активную зону. Расчет их размеров проводят так, чтобы в этом случае цепная реакция полностью прекращалась.

Для защиты обслуживающего персонала и окружающей среды от радиоактивных излучений (гамма- и бета-излучений, нейтронов) предусмотрена **радиационная защита**.

Она предполагает несколько этапов: сначала (чтобы замедлить быстрые нейтроны, вылетевшие из активной зоны) используются материалы, содержащие легкие ядра (бор), затем слой материала, состоящего из тяжелых ядер с большим Z (обычно бетон с железным заполнителем).

Поскольку в активной зоне при работе реактора выделяется значительное количество теплоты и температура в активной зоне может достигать 300 °С, то для нормальной работы реактора, тепло нужно постоянно отводить. Для этого используют специальные **теплоносители** (вода, натрий и др.), которые циркулируют в контуре, одна часть которого проходит через активную зону реактора. Другая его часть проходит через **парогенератор** (теплообменник), через который по трубам прокачивается вода под высоким давлением.

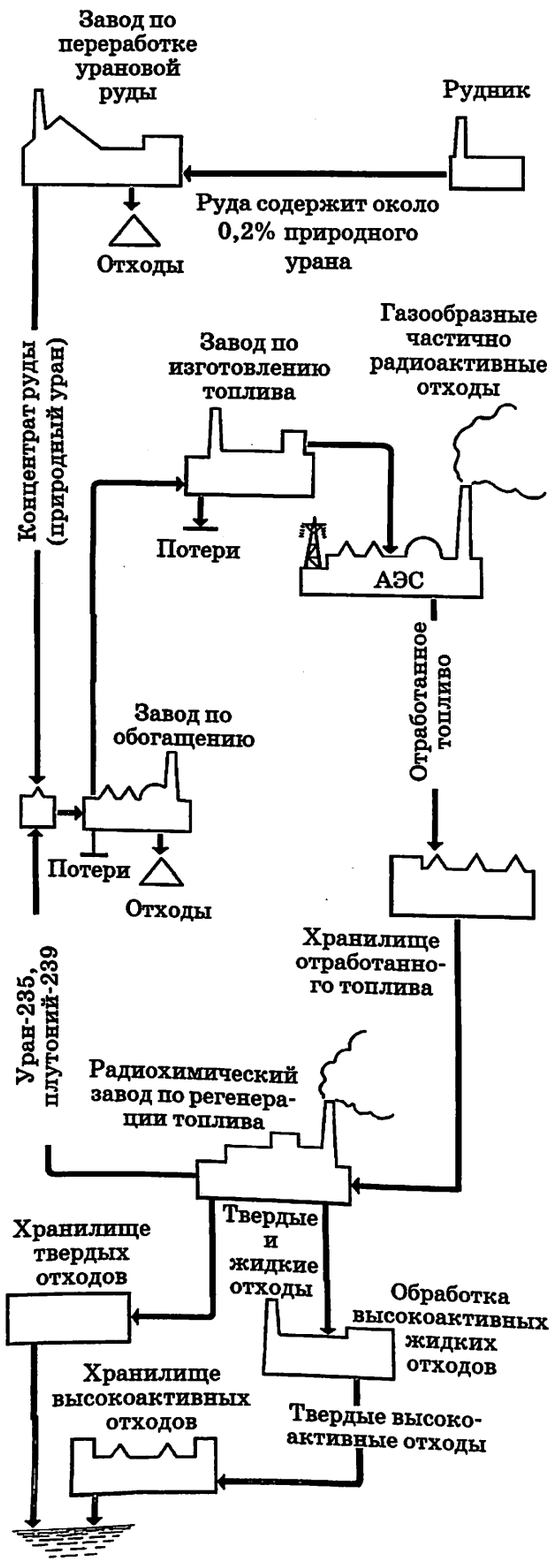
Вода нагревается и превращается в пар (его температура достигает 230 °С, а давление составляет примерно 30 атм), который подается на лопатки паровой турбины.

Паровая турбина вращается и приводит в движение ротор генератора электрической энергии.

Отработанный пар в **конденсаторе** (место, где происходит конденсация пара) превращается в воду, которая вновь подается насосом под давлением в парогенератор.

Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью современных компьютеров.

В настоящее время построены реакторы, работающие без замедлителя и использующие обогащенное урановое топливо.



Цепная реакция в них поддерживается преимущественно за счет деления ядер урана-235. Ядра урана-238 поглощают нейтроны, и путем последовательных превращений в реакторе накапливается плутоний-239, который затем используется как ядерное горючее.

Такие реакторы на быстрых нейтронах иначе называют **реакторами-размножителями**. Обычно в таких реакторах при «сгорании» 1 кг урана-235 образуется 1,5 кг плутония, то есть коэффициент вопроизводства ядерного горючего составляет 1,5.

В обычных реакторах ядерное горючее тоже воспроизводится, но коэффициент воспроизводства обычно не превышает 0,6 ... 0,7.

Впервые цепная ядерная реакция была осуществлена в США под руководством Э. Ферми в 1942 году.

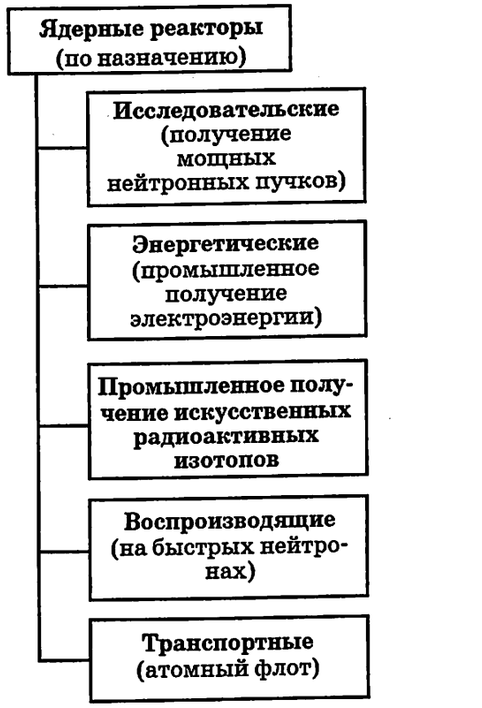
Цепная реакция длилась около получаса, после чего реактор был остановлен. Коэффициент размножения нейтронов в ней был примерно равен 1,0006.

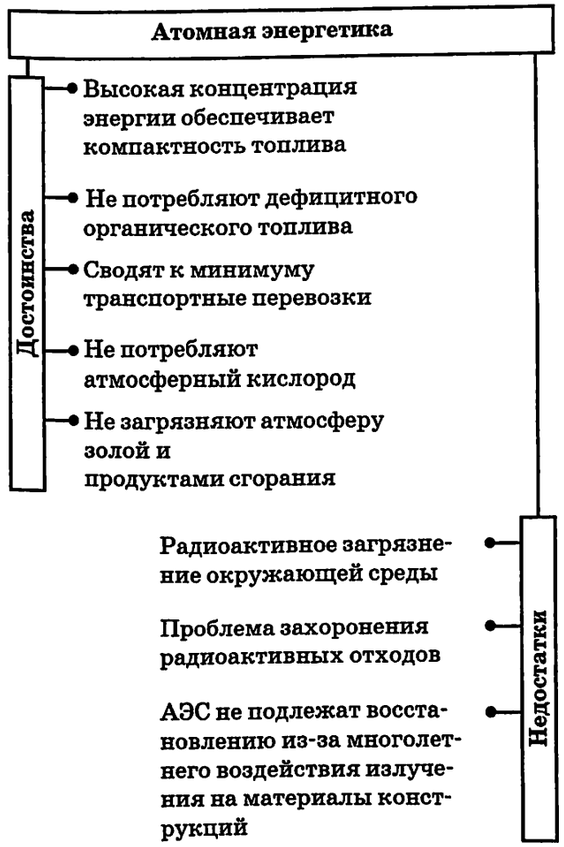
В 1946 году в нашей стране был запущен первый ядерный реактор. Работами по его созданию руководил И. В. Курчатов, и уже в 1954 году в г. Обнинске была создана первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт.

В настоящее время в мире работает около тысячи атомных реакторов разного типа и назначения (реакторы атомных электростанций, силовые установки кораблей и подводных лодок и т.п.). Мощность этих реакторов меняется в довольно широком диапазоне: от 760 МВт до 3000 МВт и более*. Электрическая мощность составляет примерно 30% мощности реактора.

Так как число АЭС и атомных реакторов в мире увеличивается, становится жизненно необходимым обеспечение контроля и безопасности работы подобных устройств. Среди многих проблем, связанных с работой АЭС, выделим две. Первая связана с необходимостью захоронения ядерных отходов, которые возникают при работе АЭС. Отработанные ТВЭЛы сохраняют активность в виде искусственных радиоактивных элементов, которые накопились в них в процессе деления, и представляют опасность для людей на протяжении нескольких тысяч лет. Поэтому они требуют тщательного профессионального захоронения. Обычно,

* Крупнейшая в мире АЭС (Фукусима, Япония) имеет мощность 9,1 млн. кВт.


Ядерные реакторы (по назначению)
Исследовательские (получение мощных нейтронных пучков)
Энергетические (промышленное получение электроэнергии)
Промышленное получение искусственных радиоактивных изотопов
Воспроизводящие (на быстрых нейтронах)
Транспортные (атомный флот)


Атомная энергетика
Достоинства
Высокая концентрация энергии обеспечивает компактность топлива
Не потребляют дефицитного органического топлива
Сводят к минимуму транспортные перевозки
Не потребляют атмосферный кислород
Не загрязняют атмосферу золой и продуктами сгорания
Недостатки
Радиоактивное загрязнение окружающей среды
Проблема захоронения радиоактивных отходов
АЭС не подлежат восстановлению из-за многолетнего воздействия излучения на материалы конструкций

их хранят в цистернах из нержавеющей стали, окруженных толстым слоем железобетона, в жидком виде. Наиболее активные отходы заливают стеклом (остекловывают), так как стекло химически нейтрально, и хранят в глубоких шахтах под землей.

Другая проблема связана с обеспечением безопасности работы АЭС в период проведения разного рода текущего и профилактического ремонта. Дело в том, что значительная доля энергии выделяется в процессах радиоактивного распада осколков реакции. Этот распад продолжается и тогда, когда реактор «заглушен» и цепные реакции в нем не происходят. Ученые подсчитали, что для реактора мощностью 1 ГВт эта дополнительная тепловая мощность составляет примерно 200 МВт.

Поэтому и после остановки реактора нужно продолжать отводить тепло из активной зоны. В противном случае, оболочка реактора может расплавиться и содержимое реактора попадет в окружающую среду.(Подобная авария произошла в 1979 году на АЭС Три-Майл-Айленд в США.)

В 1986 году в реакторе четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС загорелся графитовый замедлитель.

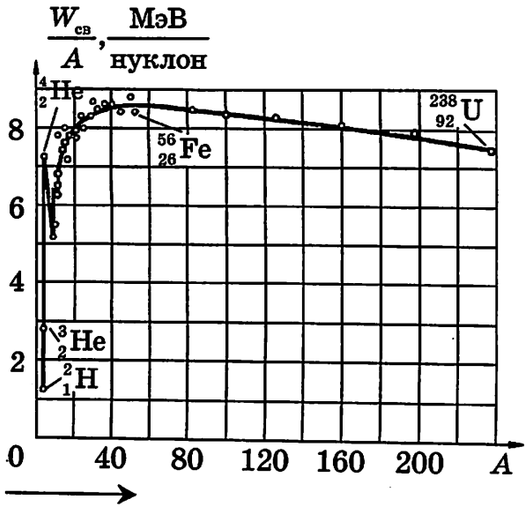
Причиной чрезмерного нагревания графита оказалась разгерметизация системы охладителя, которая произошла из-за взрыва пара. А он, в свою очередь, произошел из-за того, что из активной зоны заглушенного реактора были удалены избыточные (по сравнению с необходимым числом) регулирующие стержни. Это привело к тому, что мощность реактора за 4 с выросла с 1% нормы до ста норм, т.е. в 10^4 раз.

Взрыв пара повредил также бетонную плиту радиационной защиты. Таким образом, через образовавшийся разрыв произошел выброс радиоактивных веществ, накопившихся за время длительной работы реактора энергоблока, в атмосферу.

По оценкам специалистов радиоактивный выброс в атмосферу составил 10^{18} Бк (беккерель), что привело к радиоактивному заражению обширных территорий Украины, Белоруссии и России.

Ядерная энергетика, как и любое другое сложное техническое производство, проектируется на максимальную безопасность персонала и окружающей среды, однако, риск разрушения активной зоны из-за ошибок персонала остается реальностью, с которой необходимо считаться.

§ 16. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ



Образование более прочных ядер

Выделение энергии

Рассмотрение реакции деления ядер урана мы начали с изучения диаграммы заивисимости удельной энергии связи от массового числа. Обнаружив уменьшение энергии связи по мере возрастания массового числа, мы высказали предположение, что при реакции деления происходит образование более прочных ядер и, поэтому, в таких процессах должно происходить выделение энергии. Это предположение, как мы видели, подтвердилось на практике.

Но легкие ядра тоже имеют меньшую энергию связи, чем ядра средней части периодической системы Менделеева. Не означает ли это, что и при слиянии ядер (или, точнее: при синтезе ядер) можно наблюдать выделение энергии?

Это предположение верно. Мы привели в левом столбце пример расчета энергетического выхода реакции синтеза ядер дейтерия, в которой образуется ядро гелия.

Попытаемся на примере этой реакции выявить общие особенности подобных реакций.

Обращает на себя внимание, что энергетический выход реакции меньше, чем при реакции деления ядра урана. Но это только на первый взгляд. Если выполнить расчет удельного энергетического выхода (то есть энергии, которая выделяется в реакции в расчете на один нуклон), то она окажется не меньше, а даже больше, чем в реакциях деления.

Второй факт, который нетрудно заметить, состоит в том, что в результате слияния стабильных ядер дейтерия образуется стабильное же ядро гелия. Конечно, эта реакция, как и большинство ядерных реакций, сопровождается гамма-излучением. Зато другие радиоактивные излучения и радиоактивные осколки отсутствуют.

Третья особенность реакции состоит в том, что для ее начала необходимо сблизить ядра дейтерия на расстояние, равное радиусу действия ядерных сил. А для этого придется преодолеть значительный кулоновский барьер.

Значение кинетической энергии, которой должны обладать ядра, чтобы сблизиться на такое расстояние, можно примерно оценить. Для этого им нужно пройти ускоряющее напряжение порядка 10^6 В или иметь температуру около 10^{10}К . Вот почему реакции синтеза легких ядер называют

$$^2_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He};$$

$$2m\left(^2_1\mathrm{H}\right) = 2 \cdot 2{,}0141 = 4{,}0282 \text{ а.е.м.}$$

$$m\left(^4_2\mathrm{He}\right) = 4{,}0026 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = -0{,}0256 \text{ а.е.м.}$$

$$W = -\Delta m c^2;$$

$$W \approx -0{,}0256 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx -23{,}8 \text{ МэВ};$$

В расчете на один нуклон это составляет:

$$\frac{W}{A} = -\frac{23{,}8 \text{ МэВ}}{4 \text{ нуклон}} \approx -5{,}6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}},$$

что почти в 6 раз больше, чем в реакции деления.

$$W_к \sim \frac{kq^2}{r};$$

$$W_к \approx \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^2}{10^{-15} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 10^6 \text{ эВ}.$$

Уравнение термоядерной реакции	Энергетический выход, МэВ	Время реакции, мс
$^2_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + {}^1_0n$	3,25	1,9
$^2_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_1\mathrm{H} + {}^1_1p$	4,03	1,9
$^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0n$	17,6	3,9
$^2_1\mathrm{H} + {}^6_3\mathrm{Li} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^4_2\mathrm{He}$	22,4	7,5

Термоядерные реакции происходят в недрах Солнца (в его ядре), так как физические условия в этой области Солнца полностью соответствуют условиям протекания таких реакций:

$p = 10^{16}$ Па;

$T = 15 \cdot 10^6$ К;

$\rho = 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

$$^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^2_2\mathrm{He} + \gamma;$$

Такая реакция невозможна, так как изотопа гелий-2 не существует.

$$^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1e + \nu;$$

$$^0_{-1}e + {}^0_1e \rightarrow \gamma + \gamma;$$

Когда плотность ядер дейтерия достигнет некоторого порогового значения, становятся наиболее вероятными следующие реакции синтеза:

$$^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma$$

и начнется накопление ядер гелия-3.

$$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H};$$

$$4m\left(^1_1\mathrm{H}\right) = 4 \cdot 1{,}0078 \text{ а.е.м.} = 4{,}0312 \text{ а.е.м.}$$

$$m\left(^4_2\mathrm{He}\right) = 4{,}0026 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = -0{,}0286 \text{ а.е.м.}$$

$$W = \Delta m c^2;$$

$$W = -0{,}0286 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx -26{,}7 \text{ МэВ}.$$

термоядерными: они могут протекать только при температурах порядка нескольких сотен миллионов кельвин и высоких плотностях ($10^{14} \ldots 10^{15}$) см^{-3} сливающихся ядер.

Такие температуры в природе можно наблюдать в недрах звезд, поэтому ученые полагают, что энергия Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

По современным представлениям звезда начинает свое существование как сжимающийся под действием собственного тяготения сгусток вещества.

На ранних стадиях эволюции звезда состоит, в основном, из водорода. В ходе сжатия водород нагревается и в нем возрастает давление, которое начинает препятствовать дальнейшему сжатию. Постепенно достигается равновесие сил тяготения, направленных к центру сгущения, и сил давления, направленных навстречу.

Так, например, Солнце — это газовый шар, состоящий преимущественно из водорода и находящийся в равновесии под действием сил тяготения и давления газа.

Температура внутри звезды такова, что можно было бы допустить протекание реакции слияния двух ядер водорода с образованием изотопа гелия-2. Однако, такого изотопа у гелия не наблюдается.

Поэтому наиболее вероятным оказывается образование в такой реакции ядра дейтерия с испусканием позитрона — элементарной частицы с массой равной массе электрона и положительным элементарным зарядом, и нейтрино. Нейтрино — тоже элементарная частица, она не имеет заряда и массы покоя (о ней, как и других элементарных частицах речь пойдет в §20).

Так как плотность протонов в недрах звезды огромна, то такая реакция становится весьма вероятной и приводит к накоплению ядер дейтерия. Когда же их плотность достигает некоторого значения, вероятным становится слияние ядер водорода и дейтерия с образованием ядра гелия-3.

Когда плотность и этих ядер достигнет определенного значения, начинают происходить реакции их синтеза с образованием двух протонов и одного ядра гелия. Так в недрах звезды начинает образовываться гелий.

Все эти реакции идут с выделением энергии. В результате цикла (а в нем из четырех протонов образуется одна альфа-частица) выделяется примерно 26,7 МэВ энергии.

Термоядерные реакции

- Основной источник энергии звезд
- Основной механизм образования вещества во Вселенной

$$_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1n;$$

$_1^2\mathrm{H}$ — дейтерий получают из тяжелой воды, входящей в состав природной воды.

$_1^3\mathrm{H}$ — тритий получают искусственно в ядерной реакции, вызываемой облучением лития нейтронами.

Продолжительность реакции при температуре около 20 млн. кельвин составляет 3,9 мс

$$_3^6\mathrm{Li} + {}_0^1n \rightarrow {}_1^3\mathrm{H} + {}_2^4\mathrm{He}.$$

$$_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1n;$$

$$m\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = 2{,}0141 \text{ а.е.м.}$$

$$m\left({}_1^3\mathrm{H}\right) = 3{,}0155 \text{ а.е.м.}$$

$$m_1 = 5{,}0296 \text{ а.е.м.}$$

$$m\left({}_2^4\mathrm{He}\right) = 4{,}0026 \text{ а.е.м.}$$

$$m\left({}_0^1n\right) = 1{,}0087 \text{ а.е.м.}$$

$$m_2 = 5{,}0113 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -0{,}0183 \text{ а.е.м.}$$

$$W = \Delta m c^2;$$

$$W = -0{,}0183 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx -17{,}6 \text{ МэВ}$$

В расчете на один нуклон в данной реакции выделяется:

$$\frac{W}{A} = -\frac{17{,}6 \text{ МэВ}}{5 \text{ нуклон}} \approx -3{,}5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}},$$

т.е примерно в 3,5 раза больше, чем в реакции деления ядер урана.

Примерно 19% этой энергии «уносится» нейтрино, остальная приходится на долю гамма-излучения и кинетическую энергию дочерних ядер. По подсчетам ученых каждую секунду на Солнце в гелий превращается около 600 млрд. тонн водорода. Запаса водорода в нашем светиле хватит для того, чтобы оно светило с прежней мощностью на 10^9... 10^{10} лет.

Когда плотность ядер гелия достигнет такого значения, когда вероятными станут реакции слияния ядер гелия, будут происходить реакции, проводящие к образованию более тяжелых элементов.

Таким образом, термоядерные реакции синтеза, по оценкам ученых, играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. И вместе с ним эволюционируют звезды.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле позволило бы человеку получить практически неисчерпаемый и чистый источник энергии.

По оценкам ученых, наиболее перспективной является реакция слияния дейтерия с тритием. Дейтерий, как вы помните, стабильный изотоп водорода, входит в состав тяжелой воды.

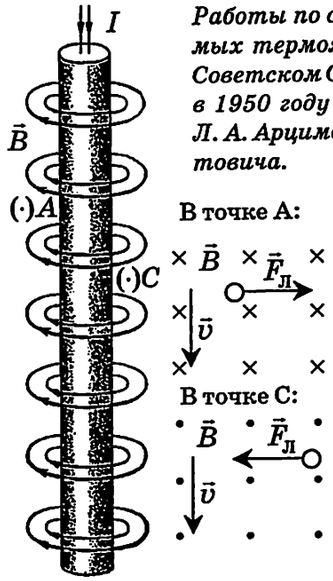
В каждом килограмме воды содержится примерно 33 мг дейтерия, следовательно, его запасы в Мировом океане составляют примерно $5 \cdot 10^{16}$ кг дейтерия. При современном уровне энергетических потребностей человечества этого количества дейтерия хватило бы, чтобы обеспечить землян энергией на 20 миллиардов лет!

При этом стоимость данного термоядерного топлива ниже стоимости обычного минерального топлива, запасы которого, к тому же быстро уменьшаются.

Поскольку запасов трития в природе нет, то его нужно получать искусственно. Наиболее перспективной для получения трития является ядерная реакция, в которой литий облучается нейтронами. В этой реакции образуется ядро трития и ядро гелия.

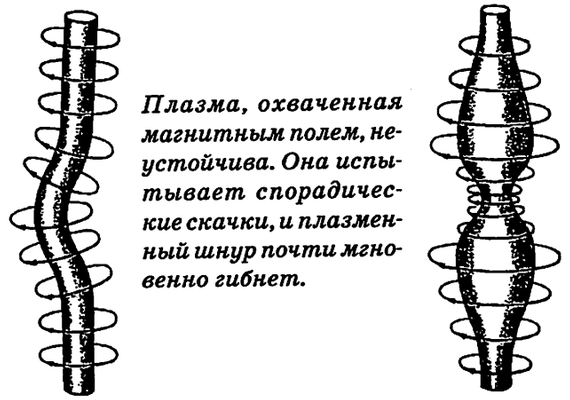
Таким образом, в рассматриваемой термоядерной реакции образуются только нерадиоактивные ядра. Это — второе ее достоинство, так как не возникает проблем с захоронением радиоактивных отходов, как в ядерной энергетике.

Энергетический выход реакции слияния дейтерия и трития составляет примерно 17,6 МэВ.

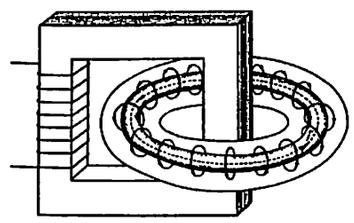


Работы по созданию управляемых термоядерный реакций в Советском Союзе были начаты в 1950 году под руководством Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича.

При пропускании через плазму тока возникающее вокруг него магнитное поле действует на частицы плазмы силами, направленными внутрь плазмы, стягивая ее в тонкий шнур



Плазма, охваченная магнитным полем, неустойчива. Она испытывает спорадические скачки, и плазменный шнур почти мгновенно гибнет.



Чтобы предотвратить охлаждение плазмы в шнуре через его торцы на электродах, плазменный шнур сворачивают в тор или в «восьмерку» и разогревают плазму индукционными токами

ТОКАМАК (тороидальная камера с магнитными катушками) — так называется установка, при помощи которой удалось наиболее близко подойти к условиям, требуемым для управления термоядерным синтезом.

Остается только создать условия, при которых такая реакция будет протекать: плотность плазмы, состоящей из материнских ядер, должна составлять 10^{14} ... 10^{15} частиц в кубическом сантиметре, а температура плазмы поддерживаться на уровне нескольких сотен миллионов кельвин!

Такие температуры при нынешнем уровне развития техники могут быть получены путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Но удержать плазму столь высокой температуры внутри установки хотя бы на протяжении 0,1 с (за это время успеет произойти слияние значительного числа ядер) пока не удается.

Понятно, что никакие стенки из вещества не способны выдержать такие температуры (они попросту испарятся!), поэтому удерживать высокотемпературную плазму в ограниченном объеме можно только магнитным полем.

Однако решить эту задачу пока не удается из-за неустойчивости плазмы, которая приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные «стенки».

В настоящее время ведутся также работы по осуществлению управляемого термоядерного синтеза за счет нагревания мишени мощными лазерными импульсами. Мишень представляет собой полый стеклянный шарик, заполненный смесью дейтерия и трития, с тонкими стенками и диаметром от 0,1 мм до 1 мм.

На эту мишень фокусируется излучение десятков мощнейших лазеров. В результате оболочка шарика практически мгновенно испаряется и разлетается в разные стороны. Содержимое шарика, в полном соответствии с законом сохранения импульса, быстро сжимается, так что температура смеси поднимается до значений, при которых происходит термоядерный синтез.

Пока такая реакция проводится в гибридных ядерных реакторах: несколько раз в секунду термоядерная мишень вводится в реактор, обстреливается лазерными импульсами, а выделяющиеся в реакции нейтроны используются для поддержания реакции деления ядер урана.

Неуправляемую реакцию термоядерного синтеза можно осуществить в термоядерной (водородной) бомбе, в которой в качестве запала, поднимающего температуру тритиево-дейтериевой смеси до нужного значения, используется атомная бомба.

§ 17. ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Уровень радиационного облучения населения

Источники облучения	мкЗв / год	%
Природные (естественные) источники		
Внешние источники: • Космическое излучение	300	8,6
Внешние источники: • Естественные радионуклиды в составе почвы, воздуха, горных пород	320	9,1
Внутренние источники: • Естественные радионуклиды в составе пищи, воды и воздуха, поступающего в легкие при дыхании	380	10,8
Искусственные источники		
• Строительные материалы минерального происхождения (помещения бытовые и производственные)	1050	30,0
• Медицинская рентгенодиагностика	1400	40,0
• Радиоактивные продукты ядерных взрывов	23	0,6
• Теплоэлектростанция (мощностью 1000 МВт, на расстоянии до 20 км)	21	0,6
• Атомная электростанция (мощностью 1000 МВт, на расстоянии до 20 км)	1	0,0
• Телевидение (просмотр передач, 4 ч в день)	10	0,3
• Полет на самолете (на расстояние 2000 км)	5	0,2

Отрасль прикладной науки, в которой производятся измерения, исследования и теоретические расчеты тех характеристик ионизирующих излучений и их взаимодействия с окружающей средой, от которых зависят радиационные эффекты в облучаемых объектах живой и неживой природы, называется **дозиметрией**.

Первоначально развитие дозиметрии определялось необходимостью защиты от воздействия рентгеновского и гамма-излучений естественных радиоактивных веществ.

В дальнейшем, с развитием ядерных технологий (строительство реакторов, ускорителей заряженных частиц и т.п.) появились новые мощные источники ядерных излучений, в том числе и отличных от рентгеновского и гамма-излучений. Это потоки нейтронов, ускоренных электронов, позитронов, протонов и других тяжелых заряженных частиц. Поэтому применение дозиметрии распространилось на службу радиационной безопасности, радиобиологию, радиационную химию, ядерную физику и радиационную технологию.

В самом начале развития дозиметрии для оценки радиационных эффектов, например, ионизации частиц среды, в качестве основной модели среды выступал воздух. Процессы, происходящие в нем, могли служить также моделью процессов в воде и мышечной ткани, так как у них близкие эффективные атомные номера.

Так как радиационные эффекты (нагревание вещества, химические и физические превращения) связаны с поглощением энергии, которую переносят излучения, то для количественного измерения действия излучения была введена физическая величина, получившая название **поглощенной дозы излучения**.

Доза излучения численно равна энергии ионизирующего излучения, поглощенной 1 кг облучаемого вещества.

Значение поглощенной дозы излучения зависит от многих факторов: от вида излучения, энергии его частиц, плотности потока частиц, а также от химического состава облучаемого вещества. Зависимость от состава облучаемого вещества обусловлена тем, что в процессах взаимодействия

Поглощенная доза излучения

1. Обозначение: D.

2. Формула-определение: $$D = \frac{W_{изл}}{m}.$$

3. Физический смысл: поглощенная доза показывает, какую энергию излучения поглотил 1 кг данного вещества.

4. Единица СИ: грэй

$$[D] = \left[\frac{W_{изл}}{m}\right] = \frac{1\ Дж}{1\ кг} = 1\ Гр.$$

4. Внесистемная единица: рад

$$1\ рад = 10^{-2}\ Гр.$$

5. Поглощенная доза излучения накапливается со временем.

Экспозиционная доза излучения

1. Обозначение: D_0.

2. Формула-определение: $$D_0 = \frac{\sum_i q_i}{m}.$$

3. Физический смысл: экспозиционная доза показывает, какой суммарный электрический заряд одного знака образуется под действием излучения в 1 кг сухого воздуха.

4. Единица СИ: кулон на килограмм

$$[D_0] = \left[\frac{\sum_i q_i}{m}\right] = \frac{Кл}{кг}.$$

5. Внесистемная единица: рентген,
1Р — такая экспозиционная доза, при которой в 1 см² сухого воздуха при нормальных условиях образуется 2, 08 · 10⁹ пар ионов,

$$1Р = 2,6 \cdot 10^{-4}\ Кл/кг$$

Вид излучения	Ионизация	Разрушение ядра	Захват ядром с последующими превращениями
Рентгеновское	фотоэффект		
Гамма-лучи	фотоэффект	фотоэффект	
Бета-лучи (электроны)	+		
Альфа-частицы	+	+	
Протоны	+	+	
Нейтроны		+	+

принимают участие не только частицы ионизирующего вещества, но и атомы (молекулы, ионы и т.п.) этого вещества.

При прочих равных условиях поглощенная доза тем больше, чем больше время облучения. Таким образом, **доза излучения накапливается со временем.**

Единица дозы излучения в СИ получила название грэй (Гр), в честь английского физика Л. Грэя. 1 грэй — это доза излучения, при которой 1 кг облученного вещества поглощает 1 Дж энергии.

На практике для измерения дозы излучения часто пользуются внесистемной единицей, называемой «рад».

Другая величина, характеризующая действие излучения, связана с его ионизирующей способностью. Она определяется отношением суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе всеми вторичными частицами при полном их торможении, к массе воздуха, содержащейся в объеме, в котором распределены эти ионы.

Эта величина получила название **экспозиционной дозы излучения**, а за единицу измерения (кулон на килограмм) принимается такая экспозиционная доза, при которой в 1 кг сухого воздуха образуется суммарный заряд одного знака в 1 Кл. Специального названия эта единица измерения не имеет. Внесистемная единица экспозиционной дозы, введенная в самом начале развития дозиметрии, называется рентгеном (Р). 1Р — такая экспозиционная доза, при которой в 1 см³ сухого воздуха при 0 °С и нормальном атмосферном давлении образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов.

Очевидно, что число пар ионов, образующихся в 1 кг вещества при воздействии на него ионизирующего излучения, зависит от поглощенной энергии, т. е. связано с поглощенной дозой. В практической дозиметрии можно считать, что 1 Р приблизительно эквивалентен поглощенной дозе 1рад, то есть примерно 0,01 Гр.

При облучении живых организмов, в том числе и человека, возникают эффекты, величина которых при одной и той же поглощенной дозе различна для разных видов излучения. Значит, знания поглощенной дозы оказывается недостаточно для того, чтобы оценить радиационную опасность.

Договорились сравнивать биологические эффекты , вызываемые любым излучением, с эффектами от рентгеновского и гамма-излучений.

Вид излучения	*K*
Рентгеновское	1
Гамма-излучение	1
Бета-излучение	1...1,5
Протоны	10
Альфа-частицы	20
Нейтроны тепловые, 0,5 Мэв быстрые, 5 МэВ	3 ...10 10 7

Коэффициент качества ионизирующего излучения

Эквивалентная доза излучения

1. Обозначение: H.

2. Формула для расчета: H = KD.

3. Единица СИ эквивалентной дозы: зиверт

1 Зв = 1 · 1Гр,

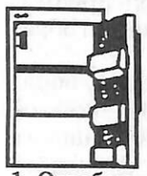
Один зиверт равен эквивалентной дозе рентгеновского или гамма-излучения, для которых поглощенная доза составляет 1 грэй.

4. Внесистемная единица эквивалентной дозы — бэр. 1бэр соответствует поглощенной дозе в 1 рад при K=1.

5. Естественные источники излучения (фон) создают за год H = 40 ... 200 мбэр.

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЯХ

При оповещении о радиационной аварии



1. Освободите от продуктов холодильник

2. Выбросьте скоропортящиеся продукты и мусор

3. Выключите воду,газ, электричество, погасите огонь в печи

4. Возьмите необходимые документы, вещи, продукты питания

5. Наденьте средства индивидуальной защиты

6. Следуйте на сборный эвакопункт

Коэффициент, показывающий во сколько раз радиационная опасность в случае хронического облучения человека для данного вида излучения больше, чем в случае рентгеновского излучения такой же дозы, называется коэффициентом качества излучения, *K*.

Для всех известных видов излучения коэффициент качества устанавливается на основании радиобиологических данных. Коэффициент качества для данного вида излучения зависит от энергии частиц этого излучения. Например, для тепловых нейтронов с энергией около 0,5 МэВ $K = 10$, а для нейтронов с энергией около 5 МэВ коэффициент качества $K = 7$.

Все эти величины используются при определении норм радиационной безопасности.

Величина, численно равная произведению поглощенной дозы излучения на коэффициент качества излучения, называется **эквивалентной дозой**. Эквивалентная доза обозначается буквой *H*, ее единица измерения в СИ называется «зиверт» (Зв).

Излучения оказывают сильное воздействие на все живые организмы, так как это воздействие происходит на уровне отдельной клетки. Живая клетка организма — это сложный механизм, которые не может функционировать нормально, если какая-то ее часть получила повреждение.

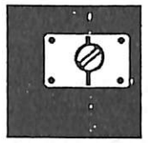
Даже слабые излучения (дополнительные к тому фоновому излучению, которое пронизывает атмосферу Земли и к которому человек на протяжении своей эволюции адаптировался) способны нанести клетке непоправимый урон.

При большой интенсивности излучений многие клетки организма погибают. При этом опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений в момент поражения даже при смертельных дозах облучения.

Механизм поражающего воздействия на клетки еще не вполне изучен, но можно предположить, что он связан с изменением химической активности ионизированных атомов и молекул. Особенно чувствительными к воздействию излучений оказываются клетки, которые быстро делятся. Это клетки костного мозга, затем крови, пищеварительного тракта и других органов.

Эта особенность используется при лечении онкологических заболеваний человека: облучение гамма-лучами быстро размножающихся клеток опухоли приводит к подавлению их развития.

При отсутствии убежища и средств защиты



1. Закройте окна и двери

2. Загерметизируйте помещение

3. Защитите продукты питания, сделайте запас воды

4. Проведите йодную профилактику

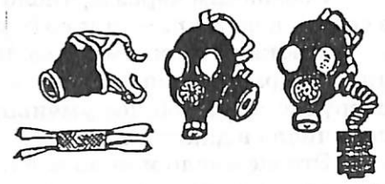
5. Отойдите от окон

6. Ждите информацию

В безопасном районе

1. Пройдите дозиметрический контроль.
2. Пройдите санитарную обработку (снимите все с себя, уложите в полиэтиленовые мешки и сдайте на пункт приема, примите душ).
3. Получите чистые одежду и обувь.
4. Пройдите дозиметрический контроль повторно.

Защита органов дыхания



Используйте респираторы, ватно-марлевые повязки, противопылевые тканевые маски,а также гражданские противогазы.

Для защиты кожных покровов используйте плащи с капюшонами, резиновую обувь, перчатки. Защитите жилище, источники воды и продукты питания. Соблюдайте правила поведения и личной гигиены.

Возникает вопрос: можно ли защититься от радиационных излучений?

Конечно, для тех людей, кто непосредственно в своей жизнедеятельности не связан с источниками радиоактивных излучений, вполне достаточно в любых ситуациях соблюдать правила личной гигиены.

Например известно, что гранит содержит в качестве примесей незначительное количество природного урана. Поэтому радиационный фон вблизи больших массивов гранита несколько выше, чем вдали от них. Однако, альфа- и бета-излучение довольно быстро поглощаются воздухом и одеждой человека.

Главная опасность при нахождении в местах с повышенным радиационным фоном — попадание радиоактивных веществ в организм с воздухом, пищей и водой.

Самый простой способ защиты от излучений — удаление от источника излучений на достаточно большое расстояние, так как даже без учета поглощения излучения в воздухе, интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому не следует брать в руки незнакомые предметы.

В тех случаях, когда удаление от источника на большое расстояние затруднительно или невозможно, используют защитные преграды из поглощающих это излучение материалов.

Проблемы защиты от радиационных излучений особенно актуальны для людей, которые работают на производстве, связанном с радиоактивными веществами.

Несмотря на то, что эти производства в значительной степени автоматизированы, принимаются особые меры безопасности. Они учитывают особенности излучений, которые для данного производства являются типичными. Наиболее сложной является защита от гамма-лучей и нейтронов.

Лучшим поглотителем для гамма-лучей является свинец, толстые железобетонные плиты, земляные насыпи. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляют с помощью графита.

В настоящее время каждый должен знать правила, которые неукоснительно нужно выполнять при радиационных авариях. Самые важные из них перечислены в левом столбце параграфа.

§ 18. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА»

Для успешного решения задач по данной теме нужно уметь записывать уравнение ядерной реакции, рассчитывать ее энергетический выход и проводить рассуждения, опираясь на определения и законы, рассмотренные в данной теме.

Рассмотрим несколько типовых задач.

Задача 1. В природе существует три радиоактивных семейства, родоначальниками которых являются изотопы урана-238, тория-232 и актиния-235. В результате последовательной серии радиоактивных распадов торий-232 превращается в стабильный изотоп свинца-208. Определите, сколько α– и β–распадов испытывают исходные изотопы в этом радиоактивном семействе при их превращении в стабильный изотоп свинца.

Для решения задачи следует воспользоваться периодической системой Менделеева, чтобы найти заряд материнского ядра и последнего в цепочке дочернего ядра.

Теперь нужно применить закон сохранения массового числа и закон сохранения электрического заряда.

При этом учтем, что массовое число изменяется только при α- распаде, так как масса электрона значительно меньше массы нуклона.

Электрический заряд изменяется в каждом из этих распадов.

Обозначим через n_α число α– распадов в серии, а через n_β — число β–распадов.

Так как в каждом α– распаде массовое число ядра уменьшается на 4 единицы, то нетрудно найти общее уменьшение массового числа в данной серии.

Это же число можно найти, сравнивая массовое число исходного материнского ядра с массовым числом конечного в цепочке стабильного изотопа.

Полученное уравнение позволит определить число α– распадов.

Теперь проведем аналогичные рассуждения в отношении изменения заряда крайних в цепочке превращений ядер.

При α– распаде заряд ядра уменьшается на 2 единицы, а при β–распаде — увеличивается на единицу.

Составляя уравнение и решая его, получим искомые числа.

Дано:
радиоактивное семейство ^{232}Th; $Z=90$.
распад заканчивается ^{208}Pb; $Z=82$.

n_α — ?

n_β — ?

Решение:

1. Если n_α – число α-распадов, то

$$\Delta A_\alpha = -4n_\alpha,$$

так как в каждом из них массовое число уменьшается на 4 единицы.

$$\Delta Z_\alpha = -2n_\alpha,$$

так как в каждом распаде заряд ядра уменьшается на 2 единицы.

2. Если n_β – число β-распадов, то

$$\Delta A_\beta = -0 \cdot n_\beta = 0,$$

так как в каждом из них массовое число не меняется.

$$\Delta Z_\beta = +1 \cdot n_\beta,$$

так как в каждом распаде заряд ядра увеличивается на одну единицу.

3. Запишем крайние в цепочке превращений ядра $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb}$ и найдем изменение массового числа и заряда ядра по сумме всех превращений:

$$\Delta A = 208 - 232 = -24,$$

$$\Delta Z = 82 - 90 = -8.$$

4. Составим уравнения и решим их.

$$\Delta A = \Delta A_\alpha + \Delta A_\beta = \Delta A_\alpha$$

или: $-4n_\alpha = -24$; $n_\alpha = 6$;

$$\Delta Z = \Delta Z_\alpha + \Delta Z_\beta;$$

или: $-2n_\alpha + n_\beta = -8$;

$$n_\beta = 2n_\alpha - 8;$$

$$n_\beta = 2 \cdot 6 - 8 = 4.$$

Ответ: $n_\alpha = 6$; $n_\beta = 4$.

Дано:
углерод-14
$T = 5570$ лет

Табличные данные:
$Z = 6$

$\frac{N_1}{N_0} = \frac{2}{3}$;

$\Delta t \sim 1000$ лет;

t – ?

Решение:

1. Пусть $N_{0,\text{пр}}$ – начальная активность (число атомов $^{14}_{6}$C) в исследуемом деревянном предмете. В начале исследования предмета нам она не известна.

2. Исследуем свежесрубленное дерево. Определим число $N_{0,\text{дер}}$ радиоактивных ядер углерода-14 в нем.

3. Допустим, что $N_{0,\text{пр}} = N_{0,\text{дер}} \equiv N_0$.

4. От момента изготовления предмета до настоящего времени прошло t лет, тогда по закону радиоактивного распада число нераспавшихся ядер:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}};$$

5. В настоящее время в исследуемом предмете содержится $N(t) = N_1$ ядер углерода-14 и

$$\frac{N_1}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}};$$

6. Подставим числовые данные и решим уравнение:

$$\frac{2}{3} = 2^{-\frac{t}{5570}};$$

$$\lg 2 - \lg 3 = \lg\left(2^{-\frac{t}{5570}}\right);$$

$$\lg 2 - \lg 3 = \left(-\frac{t}{5570}\right)\lg 2;$$

$$\frac{\lg 3}{\lg 2} - 1 = \frac{t}{5570};\quad \left(\frac{0{,}4771}{0{,}3010} - 1\right) \cdot 5570 \approx t$$

$$t = 5570 \cdot 0{,}58 \approx 3000 \text{ (лет)}$$

Рассмотрим задачу на использование закона радиоактивного распада. Напомним, что этот закон позволяет рассчитать к заданному моменту времени число нераспавшихся (то есть еще имеющихся в образце) ядер.

Задача 2. Активность изотопа углерода-14 в древних деревянных предметах составляет 2/3 активности этого изотопа в свежесрубленных деревьях. Оцените с точностью до тысячи лет возраст древних предметов, если период полураспада ядер углерода-14 равен 5570 лет.

В данной задаче рассматривается ситуация, типичная в археологии, когда нужно оценить возраст тех или иных предметов на основе закона радиоактивного распада.

Для решения этой задачи очень важно правильно «перевести» информацию, заключенную в ее тексте, в систему условных обозначений, чтобы затем записать необходимые уравнения и сформулировать в явном виде разумные допущения.

Итак, между собой сравниваются деревянные предметы, относящиеся к исследуемой культуре и свежесрубленное дерево. Допустим, что условия в отношении накапливания радиоактивного углерода-14 деревьями в процессе их роста в те далекие времена, когда были изготовлены предметы, и в то время, когда росло только что срубленное дерево, примерно одинаковы.

Тогда число радиоактивных ядер в свежесрубленном дереве (рассчитанное на ту же массу, что и масса изучаемого предмета) примерно равно начальному числу (или начальной активности) радиоактивных ядер в исследуемом предмете.

В исследуемом предмете накопление углерода-14прекратилось, когда срубили то дерево, из которого оно сделано. И за все прошедшее с тех пор время происходил только распад радиоактивных ядер.

Число радиоактивных ядер, содержащихся в исследуемом предмете в настоящее время составляет 2/3 от начального.

Теперь остается воспользоваться законом радиоактивного распада и найти возраст древних предметов.

(Поскольку неизвестная величина входит в показатель степени, для решения уравнения нужно вспомнить или повторить действия с логарифмами.)

1. Найдем в периодической системе порядковые номера железа и марганца: $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ и $^{56}_{25}\mathrm{Mn}$.

2. $^{56}_{26}\mathrm{Fe}+^{1}_{0}n\rightarrow^{56}_{25}\mathrm{Mn}+^{A}_{Z}X;$

$56+1=56+A$ – з. с. массового числа,

$26+0=25+Z$ – з. с. электрического заряда.

$A=1;\ Z=1;$

Искомое ядро $^{1}_{1}\mathrm{H}$: $^{56}_{26}\mathrm{Fe}+^{1}_{0}n\rightarrow^{56}_{25}\mathrm{Mn}+^{1}_{1}\mathrm{H}.$

3. $^{56}_{25}\mathrm{Mn}\rightarrow^{0}_{-1}e+^{A}_{Z}Y$

$56=0+A$ – з. с. массового числа,

$25=-1+Z$ – з. с. электрического заряда.

$A=56;\ Z=26;$

Искомое ядро $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$: $^{56}_{25}\mathrm{Mn}\rightarrow^{0}_{-1}e+^{56}_{26}\mathrm{Fe}.$

Задача 3. При бомбардировке ядер железа-56 нейтронами образуется β-радиоактивный изотоп марганца с массовым числом 56. Написать уравнение реакции получения искусственного радиоактивного изотопа марганца и уравнение его последующего распада.

Для того, чтобы записать уравнения этих реакций, воспользуйтесь предложенной нами в §9 формой записи.

Так как в ней в явном виде используются законы сохранения массового числа и электрического заряда, то вероятность ошибки при вычислениях становится очень незначительной.

Периодическая система Менделеева позволит найти порядковые номера (заряды) материнских и дочерних ядер.

Задача 4. При облучении протонами ядер фтора-19 образуется изотоп кислорода-16. Каков энергетический выход этой реакции?

Подсчет энергетического выхода ядерной реакции мы подробно обсуждали в §12. Там же мы привели удобную форму записи подобного рода задач.

Здесь мы рассмотрим решение еще одной задачи с тем, чтобы напомнить вам алгоритм решения задач на расчет энергетического выхода ядерной реакции.

Сопроводим решение задачи кратким комментарием.

Сначала нужно написать уравнение ядерной реакции. Это вы уже умеете хорошо делать.

Теперь, пользуясь справочными данными, нужно найти сумму масс покоя ядер, вступивших в реакцию и выразить ее в атомных единицах массы.

Аналогично найдем сумму масс покоя ядер и частиц, образовавшихся в ходе реакции (продуктов реакции).

Найдем изменение массы покоя в ходе реакции и интерпретируем полученное число. Если изменение массы покоя положительное, то реакция идет с поглощением энергии. Ее должны «принести» с собой частицы, вызывающие реакцию. Если изменение массы покоя отрицательное, то реакция идет с выделением энергии.

Переход от изменения массы к энергии проще всего провести, пользуясь энергетическим эквивалентом а.е.м.

1. Запишем уравнение ядерной реакции:

$$^{19}_{9}\mathrm{F}+^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow^{16}_{8}\mathrm{O}+^{A}_{Z}X;$$

$19+1=16+A;\quad A=4$ | $^{4}_{2}\mathrm{He};$

$9+1=8+Z;\quad Z=2$ |

$$^{19}_{9}\mathrm{F}+^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow^{16}_{8}\mathrm{O}+^{4}_{2}\mathrm{He};$$

2. Выполним расчет энергетического выхода

$m\left(^{19}_{9}\mathrm{F}\right)=18{,}9984$ а.е.м.

$m\left(^{1}_{1}\mathrm{H}\right)=\ 1{,}0078$ а.е.м.

$m_1\ =20{,}0062$ а.е.м.

$m\left(^{16}_{8}\mathrm{O}\right)=15{,}9949$ а.е.м.

$m\left(^{4}_{2}\mathrm{He}\right)=\ 4{,}0026$ а.е.м.

$m_2\ =19{,}9975$ а.е.м.

$\Delta m=m_2-m_1=-0{,}0087$ а.е.м.,

так как $\Delta m<0$, то энергия выделяется.

$$W=-0{,}0087\text{а.е.м.}\cdot 931\frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}\approx -8{,}1\ \text{МэВ}.$$

Ответ: в данной ядерной реакции происходит выделение энергии, $W=-8{,}1$ МэВ.

Дано:
деление урана-235;
в момент распада ядро покоилось;
осколки: ^{137}Ba, ^{84}Kr;
$W=200$ Мэв
$\eta=0{,}84$

Решение:

1. Запишем уравнения законов сохранения энергии и импульса:

$$\frac{m_{\text{Ba}}v_{\text{Ba}}^2}{2}+\frac{m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2}{2}=\eta W;$$
$$m_{\text{Ba}}\vec{v}_{\text{Ba}}+m_{\text{Kr}}\vec{v}_{\text{Kr}}=0.$$

2. Из уравнения закона сохранения импульса найдем соотношение скоростей осколков:

$$m_{\text{Ba}}\vec{v}_{\text{Ba}}=-m_{\text{Kr}}\vec{v}_{\text{Kr}};\quad v_{\text{Ba}}=\frac{m_{\text{Kr}}}{m_{\text{Ba}}}v_{\text{Kr}}.$$

3. Найдем энергию каждого осколка.

$$m_{\text{Ba}}v_{\text{Ba}}^2+m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2=2\eta W;$$
$$m_{\text{Ba}}\left(\frac{m_{\text{Kr}}}{m_{\text{Ba}}}v_{\text{Kr}}\right)^2+m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2=2\eta W;$$
$$m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2\left(\frac{m_{\text{Kr}}}{m_{\text{Ba}}}+1\right)=2\eta W;$$
$$\frac{m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2}{2}=\frac{\eta W}{\left(\frac{m_{\text{Kr}}}{m_{\text{Ba}}}+1\right)};\qquad \frac{m_{\text{Ba}}v_{\text{Ba}}^2}{2}=\frac{\eta W}{\left(\frac{m_{\text{Ba}}}{m_{\text{Kr}}}+1\right)};$$
$$\frac{m_{\text{Kr}}v_{\text{Kr}}^2}{2}=\frac{0{,}84\cdot 200}{\frac{84}{137}+1}=\frac{0{,}84\cdot 200\cdot 137}{221}\approx 104\ \text{МэВ};$$
$$\frac{m_{\text{Ba}}v_{\text{Ba}}^2}{2}=\frac{0{,}84\cdot 200}{\frac{137}{84}+1}=\frac{0{,}84\cdot 200\cdot 84}{221}\approx 64\ \text{МэВ}.$$

Ответ: энергия ядра бария равна примерно 64 МэВ, а ядра криптона 104 МэВ.

Задача 5. При делении одного ядра изотопа урана-235 выделяется 200 МэВ энергии. При этом 84% этой энергии приобретают осколки деления. Считая, что этими осколками являются ядра бария-137 и криптона-84 и что при распаде ядро урана покоилось, найдите энергию каждого из осколков.

Будем решать данную задачу в следующем приближении.

В процессе распада ядра происходит выделение энергии, которая перераспределяется между всеми продуктами реакции (осколками и нейтронами) в соответствии с законом сохранения энергии.

Но продукты реакции приобретают также импульс.

Будем считать, что импульс вылетевших нейтронов мал, по сравнению с импульсом осколков. Такое допущение вполне правомерно, так как масса нейтрона мала по сравнению с массами образовавшихся в реакции осколков.

Тогда, по закону сохранения импульса, осколки имеют равные по значению и противоположные по направлению импульсы, так как начальный импульс ядра равен нулю.

(Записывая уравнение закона сохранения импульса в векторном виде, вы сразу получите этот вывод математически строго.)

Так как импульс есть произведение массы осколка на его скорость, то закон сохранения импульса позволяет найти соотношение скоростей осколков.

Если теперь подставить полученное соотношение для скоростей в уравнение для закона сохранения энергии, то получим уравнение с одним неизвестным, позволяющее найти поочередно энергию каждого из осколков.

Задача 6. Карманный дозиметр представляет собой миниатюрную ионизационную камеру емкостью 3 пФ. Начальное напряжение на камере равно 180 В. Под влиянием облучения напряжение снизилось до 160 В. Объем воздуха в камере дозиметра 1,8 см^3. Определите дозу облучения.

Дано:	*СИ:*
$C=3$ пФ	$3\cdot 10^{-12}$ Ф
$U_1=180$ В	
$U_2=160$ В	
$V=1{,}8$ см^3	$1{,}8\cdot 10^{-6}$ м^3
D — ?	

1. По формуле электроемкости конденсатора

$$C=\frac{q}{U},\ \text{получим: } q_1=CU_1; q_2=CU_2;$$

$$\Delta q=q_2-q_1=C(U_2-U_1).$$

2. Считая, что под действием излучения образуются однозарядные ионы, определим число пар ионов, которые образовались в ионизационной камере:

$$N=\frac{|\Delta q|}{e}=\frac{C|\Delta U|}{e}.$$

3. Такое число пар ионов образовалось в объеме камеры, а в $V_0=1$ см^3 число пар ионов составит:

$$N_0=N\cdot\frac{V_0}{V}.$$

Тогда экспозиционная доза составит:

$$D_0=\frac{N_0}{2\cdot10^9}=\frac{N}{2\cdot10^9}\cdot\frac{V_0}{V}(\text{Р})=\frac{C|\Delta U|}{2\cdot10^9\cdot e}\cdot\frac{V_0}{V}(\text{Р}),$$

$$D_0=\frac{3\cdot10^{-12}\cdot20}{2\cdot10^9\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}\cdot\frac{10^{-6}}{1{,}8\cdot10^{-6}}(\text{Р})=0{,}1\ \text{Р}.$$

Эта экспозиционная доза эквивалентна поглощенной дозе $D\approx0{,}001$ Гр $\approx0{,}1$ рад.

Под действием ионизации воздуха внутри конденсатора (ионизационной камеры) образуются заряженные частицы.

Двигаясь в электрическом поле, они достигают пластин конденсатора и разряжают его. В результате, напряжение между обкладками конденсатора уменьшается.

Зная емкость конденсатора и изменение напряжения между его обкладками, можно рассчитать изменение заряда конденсатора.

Именно такой заряд (одного знака) и образовался за это время в результате действия излучения.

Сравнивая значение этого заряда с элементарным зарядом (то есть полагая, что при облучении образуются однозарядные ионы), найдем число пар ионов, которые образовались в результате действия излучения.

Эти ионы образовались в объеме камеры, а чтобы найти экспозиционную дозу в рентгенах, найдем число пар ионов в одном кубическом сантиметре воздуха.

Считая , что воздух в камере находится при нормальных условиях, рассчитаем экспозиционную дозу излучения сначала в рентгенах, а затем и поглощенную дозу в рад и грэй.

Задача 7. Найти наименьшую частоту гамма-кванта, достаточную для осуществления следующей фотоядерной реакции:

$$^{25}_{12}\text{Mg}(\gamma,n).$$

Для решения задачи запишем уравнение реакции в обычном виде.

Теперь определим энергетический выход этой реакции, пользуясь уже известным вам алгоритмом.

Вычисления показывают, что реакция идет с поглощением энергии: ее должен принести с собой гамма-квант.

Для расчета частоты этого гамма-кванта воспользуемся формулой Планка: энергия кванта прямо пропорциональна его частоте.

Для того, чтобы получить частоту в герцах, энергию кванта следует выразить в Дж. Поэтому рассчитывая энергию гамма-кванта сначала в МэВ, затем переведем ее в джоули. Для этого нужно воспользоваться определением электронвольта.

Обратите внимание на порядок частоты кванта.

1. $^{25}_{12}\text{Mg}+\gamma\to^1_0 n+^A_Z X;$

$25=1+A;\ A=24$ | $^{24}_{12}\text{Mg}.$

$12=0+Z;\ Z=12$ |

$^{25}_{12}\text{Mg}+\gamma\to^1_0 n+^{24}_{12}\text{Mg}.$

2. Найдем энергетический выход реакции.

$m_1=m\left(^{25}_{12}\text{Mg}\right)=24{,}9858$ а.е.м.

$m\left(^1_0 n\right)=1{,}0087$ а.е.м.

$m\left(^{24}_{12}\text{Mg}\right)=23{,}9850$ а.е.м.

$m_2=24{,}9937$ а.е.м.

$\Delta m=m_2-m_1=0{,}0079$ а.е.м.

$\Delta m>0$, следовательно, энергия поглощается, ее должен принести γ-квант с частотой $\nu=\frac{W}{h}$.

$$\nu=\frac{0{,}0079\cdot931\cdot10^6\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}{6{,}67\cdot10^{-34}}=1{,}8\cdot10^{21}\ (\text{Гц})$$

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

1. Атом Томсона
2. Планетарная модель атома
3. Атом Резерфорда-Бора
4. Электрон-частица
5. Электрон-волна
6. Протон-нейтронная модель ядра
7. Капельная модель ядра

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

Дуализм : волна — частица.

1. Равномерное движение электронов по круговой орбите
2. Волновое движение электрона вокруг ядра

ПОСТУЛАТЫ

1. Атомная система может находиться только в особых, стационарных (или квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия, W_1, W_2, ..., W_n. В стационарных состояниях атом не излучает.
2. Излучение или поглощение света происходит квантами при переходе из одного стационарного состояния в другое. Энергия излученного или поглощенного фотона равна изменению энергии этих стационарных состояний $h\nu_{k,n}=|W_n-W_k|$.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

1. Гравитационное (силы тяготения)
2. Электромагнитное (электромагнитные силы Кулона, Лоренца)
3. Сильное (ядерные силы)

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОПЫТЫ

1. Открытие электрона
2. Опыты по рассеянию альфа-частиц
3. Экспериментальное подтверждение существования стационарных состояний атома
4. Установление природы альфа-, бета- и гамма-излучений
5. Открытие протона
6. Открытие нейтрона
7. Открытие деления ядер урана
8. Получение цепной реакции

ПРИНЦИПЫ

Принцип соответствия: любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание процессов и на более широкую область применимости, чем старая, должна включать в себя последнюю как предельный случай.

Принцип неопределенности: характеризующие физическую систему дополнительные физические величины (координата и импульс; энергия и время) не могут одновременно принимать точные значения. Неопрделенность при одновременном измерении этих величин связаны соотношением неопределенностей $\Delta p_x\Delta x\geq\hbar$.

ЗАКОНЫ

1. Закон сохранения энергии
2. Закон сохранения импульса
3. Закон сохранения момента импульса
4. Закон сохранения электрического заряда
5. Закон сохранения массового числа
6. Закон радиоактивного распада

ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

1. Испускание и поглощение света атомами. Наличие закономерностей в спектрах испускания и поглощения.
2. Радиоактивность (естественная и искусственная).
3. Ядерные реакции
4. Деление ядер урана под действием нейтронов.
5. Термоядерный синтез.
6. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом (ионизация атомов вещества, упругое и неупругое рассеяние, захват нейтронов ядрами атомов).

ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ

§ 19. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

В этом параграфе мы познакомимся с устройствами, которые сделали возможным само возникновение и развитие физики атомного ядра, и при помощи которых были открыты элементарные частицы. Именно они дают нам информацию о тех реальных событиях, которые происходят в микромире.

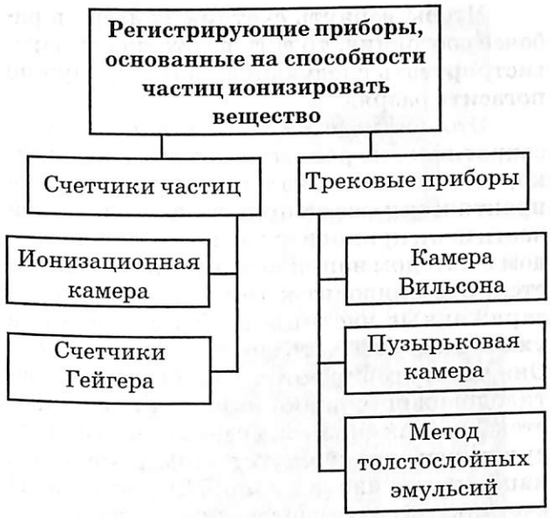
При изучении явлений микромира во многих случаях бывает необходимо обнаружить наличие частиц, участвующих в этих процессах, определить их число, измерить или оценить их массу, электрический заряд, энергию или скорость.

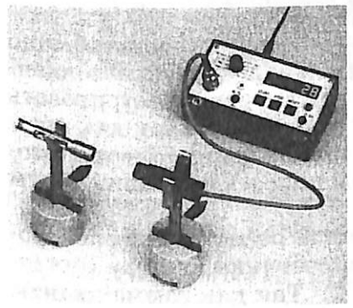
Все методы регистрации частиц основаны на взаимодействии этих частиц с ядрами атомов, атомами (особенно с атомными электронами) и молекулами вещества, через которое они проходят. Мы привели в левом столбце схему, содержащую информацию об основных явлениях, сопровождающих прохождение заряженных частиц, гамма-квантов и нейтронов через вещество, так как для каждого вида частиц можно выделить специфические явления.

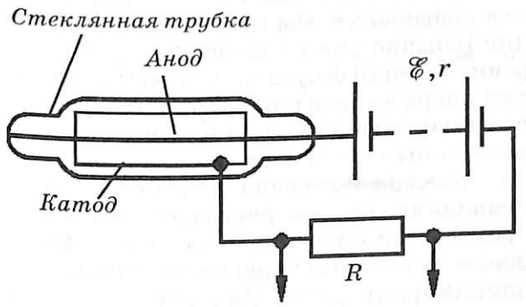
Методы регистрации частиц очень разнообразны, а регистрирующие приборы — довольно сложные и дорогостоящие устройства (особенно, когда речь идет об изучении частиц высоких энергий). Но всем им присуща важная особенность: в рабочем объеме прибора происходят микроскопические изменения, которые преобразуются в макроскопические.

Их действие похоже на действие спускового механизма, когда система «готова откликнуться» на чрезвычайно слабое воздействие. Таким образом, регистрирующее устройство находится в состоянии неустойчивого равновесия. А прохождение частицы через его рабочее вещество вызывает переход системы в состояние устойчивого равновесия. Этот макроскопический процесс и позволяет зарегистрировать частицу.

С простейшим методом регистрации частиц — методом сцинтилляций — вы уже знакомы. О некоторых других мы тоже упоминали, рассказывая об открытиях в области атомной и ядерной физики. Теперь познакомимся с ними более подробно.







1. Когда частицы внутри прибора отсутствуют:

$$\mathscr{E} = U_{а,к} + IR + Ir;$$

$$U_{а,к} = \mathscr{E}, \text{ так как } I = 0.$$

2. Когда частица вызывает ионизацию, в трубке появляется ток и

$$U_{а,к} = \mathscr{E} - IR - Ir,$$

Так как R велико, а $\mathscr{E} = \text{const}$, то $U_{а,к}$ резко уменьшается и разряд в газе прекращается.

Ионизационная камера. Простейшая ионизационная камера представляет собой замкнутый сосуд (заполненный газом под определенным давлением), внутри которого между двумя электродами создается электрическое поле.

В обычных условиях газ между электродами является диэлектриком и не проводит электрический ток. Если через ионизационную камеру проходит заряженная частица, то она ионизирует газ, то есть в камере образуются свободные заряженные частицы. Под действием электрического поля они приходят в движение и в цепи камеры возникает электрический ток, который фиксируется чувствительным гальванометром.

В зависимости от условий задачи ионизационные камеры по форме электродов могут иметь вид плоского, цилиндрического или сферического конденсатора. Размеры их могут быть тоже весьма разными: от долей кубического миллиметра до сотен литров.

Помимо лабораторного назначения они могут входить в качестве составной части в такие приборы как рентгенометры и дозиметры.

Счетчик Гейгера. Это один из важнейших приборов для автоматического счета частиц.

Хорошие счетчики Гейгера способны регистрировать до 10000 и более частиц за 1 с. Счетчик состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем, и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки. Обычно трубка заполняется аргоном.

Действие счетчика Гейгера основано на ударной ионизации. Заряженная частица, пролетая в газе, ионизирует его. Электрическое поле приводит ионы и электроны, возникшие при ионизации в движение. Значение напряжения между анодом и катодом подбирается так, чтобы электроны при движении к аноду успевали набрать энергию, достаточную для ионизации газа.

При этом число заряженных частиц в рабочем объеме счетчика возрастает лавинообразно. Следовательно, растет и сила тока в цепи счетчика, а вместе с ней и падение напряжения на резисторе R.

Импульс напряжения на резисторе вызывает срабатывание регистрирующего устройства (обычно, это механический счетчик частиц).

Счетчик Гейгера

1. Рабочее тело — смесь аргона с воздухом и парами спирта;

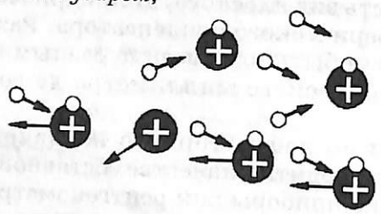
2. Давление смеси около 0,1атм (10^4Па);

3. ЭДС батареи (напряжение между анодом и катодом в состоянии готовности) от 800 В до 3000 В;

4. Разрешающая способность (то есть число частиц, которые могут быть зарегистрированы за 1 с) от 10^3 до 10^{10} $с^{-1}$;

5. Эффективность регистрации для электронов (бета-излучение) ~ 100%, для гамма-квантов ~ 1%;

6. Механизм регистрации: электрический разряд в газе в результате ионизации атомов электронным ударом;



7. Для повышения эффективности регистрации гамма-излучения используют явление фотоэффекта, для чего стенки сосуда покрывают металлом с малой работой выхода.

Чтобы вернуть счетчик Гейгера в рабочее состояние, то есть в готовность зарегистрировать следующую частицу, нужно погасить разряд.

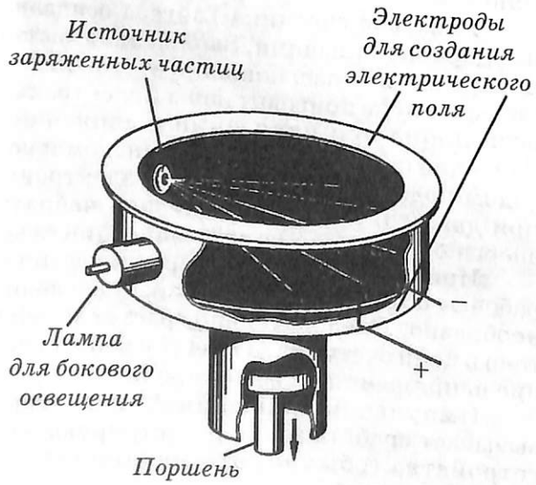
Это достигается автоматически: если сопротивление резистора достаточно велико, то в момент появления импульса тока практически все напряжение во внешней части цепи приходится на него. Между анодом и катодом напряжение резко уменьшается. Это приводит к тому, что свободные заряженные частицы в объеме счетчика уже не могут вызвать ионизацию газа в нем. Они просто собираются на электродах противоположного знака и разряд прекращается. Так как сила тока в цепи счетчика отсутствует, то между анодом и катодом напряжение снова равно ЭДС батареи. И счетчик готов к регистрации следующей заряженной частицы.

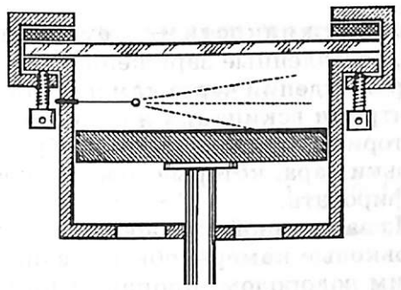
Счетчик Гейгера используется обычно для регистрации электронов и гамма-квантов. Альфа-частицы трудно регистрировать при помощи этого счетчика, так как нужно иметь очень тонкое «окно», через которое они могли бы попасть в рабочий объем счетчика.

Эффективность регистрации электронов при помощи счетчика Гейгера составляет около 100%. Так как гамма-кванты непосредственно слабо ионизируют газ, то для повышения эффективности регистрации (обычно она не превышает 1%) внутренние стенки сосуда покрывают металлом с малой работой выхода. Тогда газовый разряд вызывают выбитые излучением фотоэлектроны.

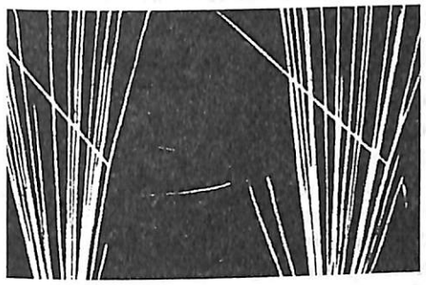
Камера Вильсона. Счетчики Гейгера позволяют только регистрировать факт прохождения частицы через них и фиксировать некоторые характеристики частиц, например, энергию. Значительно больше информации о частице и событиях микромира можно получить в «трековых» приборах. К числу таких приборов относится камера Вильсона.

Этот прибор был изобретен в 1912 году английским физиком Ч. Вильсоном. Он представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный воздухом и парами воды или спирта близкими к состоянию насыщения. Объем рабочей камеры может меняться при помощи поршня. При резком опускании поршня происходит адиабатное расширение газа в камере. Это приводит к понижению температуры и пересыщению пара.





Треки частиц в камере Вильсона



Камера Вильсона

1. Трековый прибор

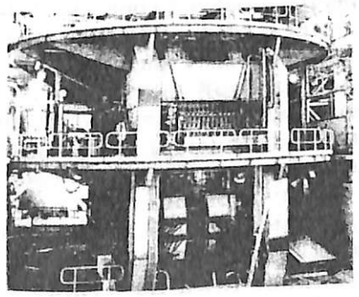
2. Рабочее тело — воздух (водород, гелий, аргон, азот) и насыщенные пары воды и спирта;

3. Объем камеры от 10^{-5} до 1 $м^3$;

4. Время чувствительности (длительность рабочего цикла) камеры от 0,1 до 1 с;

5. Механизм регистрации: конденсация капелек жидкости на ионах, образованных при движении частицы внутри камеры;

6. При использовании электрического и магнитного полей возможно определение знака заряда, удельного заряда, импульса и энергии частицы.



Российско-французская водородная пузырьковая камера «Мирабель»

Это состояние пара крайне неустойчивое. Пересыщенный пар начнет конденсироваться в капельки жидкости, как только появятся «центры конденсации», нарушающие однородность газа в камере.

Такими центрами конденсации становятся ионы, которые образуют заряженные частицы вдоль траектории своего движения. Внутри камеры появляется трек — цепочка мельчайших капелек жидкости, который можно сфотографировать.

Для удаления «старых» ионов используются электрические поля. В зависимости от размеров камеры время восстановления рабочего режима может меняться от нескольких секунд до десятков минут.

Информация, которую дают треки, значительно богаче той, которую дают счетчики. Например, по длине трека можно определить энергию частицы, по изменению «толщины» трека — направление движения частицы, по числу капелек на единице длины — скорость частицы. В камеру можно поместить различные преграды для изучения частиц очень высоких энергий.

Советскими физиками П. Л. Капицей и Д. В. Скобельцыным был разработан метод, позволяющий определять знак заряда частицы, измерять ее удельный заряд и импульс частицы. Для этого камеру Вильсона нужно поместить в однородное магнитное поле.

Нейтральные частицы в камере Вильсона регистрируются по вторичным эффектам, так как сами они практически не ионизируют вещество.

Пузырьковая камера. Главный недостаток камеры Вильсона — малая плотность вещества в ней, устранен в приборе, который был сконструирован в 1952 году.

Плотность жидкости в тысячи раз больше плотности газа, поэтому заполняя камеру жидкостью, можно было бы увеличить потери энергии частицы на единице длины и наблюдать взаимодействия, которые приводили бы к появлению новых частиц. Но как сделать состояние жидкости неустойчивым?

Было предложено нагревать жидкость до температуры кипения, а затем резко понижать давление. Так как температура кипения уменьшается при понижении давления, то в этом процессе образуется «перегретая» жидкость: она имеет температуру более высокую, чем температура кипения при данном давлении. Это

Пузырьковая камера

1. Трековый прибор;

2. Рабочее тело — жидкий водород, пропан или другие жидкости;

3. Давление в нагретой жидкости (предотвращающее ее кипение) от 3 до 22 атм;

4. Объем камеры от $2 \cdot 10^{-3}$ до $2{,}5 \cdot 10^{2}$ м^3;

5. Время чувствительности (длительность рабочего цикла) камеры от 4 до 10 с;

6. Механизм регистрации: вскипание (образование пузырьков) перегретой жидкости на ионах, образованных при прохождении частиц через объем камеры;

6. При использовании электрических и магнитных полей возможны определение знака заряда, удельного заряда, импульса, энергии частицы.

Z = 10, 20, 26

Треки тяжелых ядер в фотоэмульсии

Образование ливней частиц в фотоэмульсии

Метод толстослойных эмульсий

1. Трековый прибор;

2. Рабочее тело — кристаллики бромистого серебра в растворе желатина;

3. Толщина фотоэмульсий от 25 до 2000 мкм, бромистое серебро составляет 85-87% массы эмульсии;

4. Время чувствительности практически не органичено;

5. Механизм регистрации: ионизация атомов брома при прохождении частицы через эмульсию с последующим восстановлением металлического серебра при проявлении эмульсии;

6. Определение направления движения частиц, место возникновения частицы, значение энергии, идентификация частиц.

состояние жидкости — неустойчивое. Ионы, оставленные заряженной частицей при прохождении через камеру, становятся центрами вскипания жидкости. Вдоль траектории движения частицы образуются пузырьки пара, которые тоже можно сфотографировать.

Из-за большой плотности вещества (а пузырьковые камеры обычно заполняют жидким водородом, пропаном или фреоном) частицы быстро теряют свою энергию. Поэтому в такой камере можно наблюдать процессы распада частиц и вызываемые этими частицами реакции.

Метод толстослойных эмульсий. Как вы помните, А. Беккерель обнаружил явление радиоактивности при помощи фотографической пластинки. С тех пор этот метод, усовершенствованный и развитый советскими физиками Л. В. Мысовским и А. П. Ждановым, используется для исследования процессов в микромире.

Фотоэмульсия, которую используют для изучения явлений микромира, отличается от обычной, предназначенной для фотографирования в оптических лучах. Она содержит большое количество микроскопических кристаллов бромида серебра (до 85-87% по массе) и соответствующие размеры этих зерен. Ядерные фотоэмульсии имеют значительно большую толщину, чем оптические. Часто используются многослойные фотоэмульсии без «подложек». Такие стопки фотоэмульсии позволяют проводить уникальные наблюдения.

Быстрая частица, проходя через такой кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома.

Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении пластинки в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зерен серебра образует трек частицы.

По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

Из-за большой плотности вещества фотоэмульсии треки получаются довольно короткими. Например, треки альфа-частиц, испускаемых радиоактивными веществами, в фотоэмульсии имеют длину около 10^{-3} см. При проявлении эти фотографии можно увеличить.

Фотопластинки не нужно «приводить» в рабочее состояние, они могут «накапливать» информацию. Это позволяет наблюдать редкие явления.

§ 20. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Электрон, e^-

1. 1897 год, Дж. Дж. Томсон.

2. Масса покоя $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

3. Электрический заряд $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

$q_e = -1$ (отрицательный элементарный заряд).

4. Спин $s = 1/2$.

5. Стабилен (экспериментально $\tau_{жизни} > 10^{22}$ лет).

Фотон, γ

1. 1900 год, М. Планк, 1905 год, А. Эйнштейн.

2. Масса покоя $m_\gamma = 0$.

3. Электрический заряд $q_\gamma = 0$.

4. Спин $s = 1$.

5. Стабилен.

Существует неограниченно долго в отсутствие других тел.

Протон, p

1. 1911 год, Э. Резерфорд.

2. Масса покоя $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

3. Электрический заряд $q_p = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

$q_p = +1$ (положительный элементарный заряд).

4. Спин $s = 1/2$.

5. Стабилен (современная оценка $\tau_{жизни} > 10^{32}$ лет).

Нейтрон, n

1. 1932 год, Д. Чедвик.

2. Масса покоя $m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

3. Электрический заряд $q_n = 0$.

4. Спин $s = 1/2$.

5. Нестабилен. Среднее время жизни в свободном состоянии $\tau = 900$ с.

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e.$$

Позитрон, e^+

1. 1929 год П. Дирак (предсказал существование), 1932 год, К. Андерсон.

2. Масса покоя $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

3. Электрический заряд $q = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

$q = +1$ (положительный элементарный заряд).

4. Спин $s = 1/2$.

5. Стабилен как электрон.

При изложении материала мы много раз употребляли термин «элементарные частицы». Вы познакомились с историей открытия и свойствами некоторых из них: фотона, электрона, протона и нейтрона. Однако, до сих пор мы не определили смысл этого термина более или менее строго. Что же такое элементарная частица?

Вероятно, самый простой и естественный ответ на этот вопрос можно было бы дать в духе Демокрита, который полагал, что в природе существуют наименьшие, неделимые (бесструктурные) частицы — атомы, из которых построено все сущее в мире. Разные комбинации атомов образуют различные вещества, из которых построены все тела «живой» и «неживой» природы. Различные превращения (явления), происходящие в мире — не более, чем перестановка атомов. Все течет, все изменяется, кроме атомов, которые остаются **неделимыми, неизменными,** т. е. **вечными.**

Если оставаться в рамках гипотезы Демокрита, то открытие сложного строения атома и атомного ядра только «переместило вглубь» кирпичики мироздания: не атомы, а электрон, протон и фотон (сразу после их открытия и примерно до 1932 года) представлялись ученым теми частицами, из которых образуются более сложные — ядра, атомы, молекулы.

Однако, вскоре выяснилось, что, во-первых, ни одна из частиц «вечной» не является. Например, фотон, испущенный нитью накаливания в настольной лампе, живет не более 10^{-8} с. За это время он успевает долететь до поверхности стола и поглотиться ею. У электрона и протона имеются античастицы, при столкновении с которыми они «исчезают», «аннигилируют», превращаясь в другие частицы.

Во-вторых, главным свойством частиц, называемых сегодня элементарными, является их способность превращаться друг в друга. Так свободный нейтрон в среднем за 16 мин испускает электрон и антинейтрино, превращаясь в протон.

Таким образом, от идей неизменности и вечности «кирпичиков мироздания» пришлось отказаться под давлением фактов, а вот идея об их неделимости, неразложимости на более мелкие частицы, сохранилась. И это тоже опытный факт : любые попытки разделить частицу на более мелкие части

Нейтрино, ν_e

1. 1933 год, В. Паули (предсказал существование), 1956 год, К. Коуэн.

2. Масса покоя $m_\nu \approx 0$.

3. Электрический заряд $q_\nu = 0$.

4. Спин $s = 1/2$.

5. Возможно стабильно.

Масса, m

1. Количественная характеристика инертных свойств частицы. Определяет ускорение, которое частица приобретает в данном электрическом (или магнитном) поле (инертная масса).

2. Количественная характеристика, определяющая значение силы гравитационного притяжения данной частицы к другой частице (гравитационная масса).

3. $m_{\text{инертная}} = m_{\text{гравитационная}}$.

Электрический заряд, q

Количественная характеристика электромагнитных свойств частицы. Определяет значение силы кулоновского взаимодействия с другой заряженной частицей.

Спин (собственный механический момент количества движения), s

1. Обнаруживается при движении атомов в неоднородном магнитном поле (опыт Штерна и Герлаха).

2. Оказывает существенное влияние на поведение системы, состоящей из одинаковых частиц (принцип Паули).

3. Модель элементарной частицы — вращающийся волчок.

4. Квантуется, то есть принимает дискретный ряд значений, минимальный скачок равен постоянной Планка $\hbar$.

5. Измеряется в единицах $\hbar$ и может принимать целые или полуцелые значения у разных частиц.

Магнитный (собственный) момент, $\vec{\mu}$

1. Обусловлен наличием спина у частицы.

2. Обнаруживается при взаимодействии частицы с магнитным полем.

приводит к их превращению в другие, уже известные, частицы. При этом чем большую энергию мы сообщаем частицам, чтобы «разделить их на части», тем большее количество частиц рождается при столкновении, и притом большей массы. Рождаемые при столкновении новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц-«родителей».

Таким образом, по современным представлениям **элементарные частицы — это первичные, неразложимые далее частицы, из которых построена вся материя.**

Элементарные частицы различаются по своим свойствам и значениям физических величин, которые эти свойства характеризуют .

Первые две величины вам хорошо известны: это масса (покоя) и электрический заряд. Они характеризуют способность частицы к соответствующему виду взаимодействия: первая — к гравитационному, вторая — к электромагнитному.

Не случайно, что идентификация частицы связана с измерением ее удельного заряда, то есть отношения заряда частицы к ее массе.

Однако, эти свойства, как оказалось, не единственные.

Как вы помните, каждый объект обнаруживает свои свойства при определенных условиях. Так кусок проволоки обнаруживает способность ограничивать силу тока, когда его включают в электрическую цепь. Это свойство в количественном отношении характеризует величина, называемая электрическим сопротивлением.

Так и с элементарными частицами: пока исследования ограничивались сравнительно небольшими значениями энергии и изучалось движение частиц в электрическом и магнитном полях, на передний план выходили именно их масса и заряд. Когда же ученые стали изучать более тонкие эффекты, сразу обнаружились и другие свойства элементарных частиц.

Оказалось, что они обладают собственным механическим моментом количества движения (спином) и магнитным моментом. Затем выяснилось, что некоторым (нестабильным) частицам в свободном состоянии следует приписать некоторое «время жизни» или среднюю продолжительность их существования от момента «рождения» до момента их спонтанного превращения (или распада) в другие частицы.

Закон сохранения электрического заряда

$$^4_2\text{He} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1 p \qquad 2+7=8+1$$

$$\gamma + ^2_1\text{H} \rightarrow ^1_1 p + ^1_0 n \qquad 0+1=1+0$$

$$^1_0 n \rightarrow ^1_1 p + ^0_{-1} e + ^0_0 \tilde{\nu} \qquad 0=1-1+0$$

Алгебраическая сумма электрических зарядов частиц, вступающих в реакцию, равна алгебраической сумме электрических зарядов частиц-продуктов реакции.

Закон сохранения барионного заряда

$$^4_2\text{He} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1 p \qquad 4+14=17+1$$

$$\gamma + ^2_1\text{H} \rightarrow ^1_1 p + ^1_0 n \qquad 0+2=1+1$$

$$^1_0 n \rightarrow ^1_1 p + ^0_{-1} e + ^0_0 \tilde{\nu} \qquad 1=1+0+0$$

Алгебраическая сумма барионных зарядов частиц, вступающих в реакцию, равна алгебраической сумме барионных зарядов частиц-продуктов реакции.

Не наблюдаются процессы исчезновения нуклонов ($p + e^- \rightarrow 2\gamma$ — не происходит, хотя закон сохранения электрического заряда не запрещает.)

Закон сохранения лептонного заряда

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e \qquad +1_\mu = +1_e + 1_\mu - 1_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e \qquad -1_\mu = -1_e - 1_\mu + 1_e$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu \qquad 0 = +1_\mu - 1_\mu$$

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+ \qquad -1_\mu + 0 = 0 \quad -1_\mu$$

Векторная сумма лептонных зарядов частиц, вступивших в реакцию, равна векторной сумме лептонных зарядов частиц-продуктов реакции.

Не наблюдаются процессы исчезновения или появления лептонов:

$$p + p \rightarrow 2n + 2e^+ \qquad 0+0 \neq 0+2\cdot(-1_e)$$

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow n + e^+ \qquad -1_\mu + 0 \neq 0 - 1_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \qquad -1_\mu \neq -1_e$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \qquad +1_\mu \neq +1_e$$

(в этих реакциях законы сохранения электрического заряда и барионного заряда выполняются).

При исследовании сильного и слабого взаимодействий (спонтанный распад частиц, бета-распад) частицы проявили (обнаружили) свойства, для характеристики которых были введены барионный заряд, лептонный заряд, изотопический спин, странность. А когда была создана кварковая модель нуклонов, потребовалось ввести «цветовой заряд» или просто «цвет», чтобы различать кварки между собой.

Таким образом, число свойств у элементарных частиц оказалось весьма значительным, и дальнейшее их изучение, наверняка, приведет еще к новым открытиям, подтверждая тезис о том, что свойства элементарных частиц неисчерпаемы.

Как же тогда научиться ориентироваться в таком непривычном и, поэтому, сложном мире элементарных частиц? И здесь, как это часто бывало в истории развития физики, на помощь приходят законы сохранения.

Законы сохранения управляют всеми превращениями в мире элементарных частиц. Их можно разбить на две группы.

К первой группе отнесем законы сохранения, которые выражают неуничтожимость материи или определенных свойств элементарных частиц.

Это, например, хорошо вам известный закон сохранения электрического заряда. Другие законы сохранения: закон сохранения барионного заряда и закон сохранения лептонного заряда — новые для вас законы. Смысл этих законов такой же, как и у закона сохранения электрического заряда, нужно только приписать частице «барионный заряд» или «лептонный заряд» и ввести единицу соответствующего заряда.

Анализ многочисленных превращений элементарных частиц показал, что наблюдаются только такие процессы, в которых число частиц, способных к сильному взаимодействию, сохраняется.

Для того, чтобы количественно выразить это положение , таким частицам (барионам) приписывается барионный заряд. Он может принимать значение +1 (например, у нуклонов), −1(например, у антинуклонов) или 0 (у электрона, позитрона и мезонов).

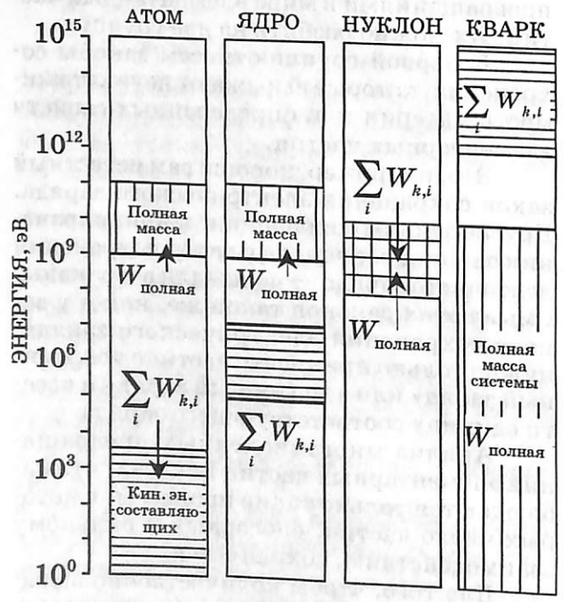
Аналогично, в исследованиях установлено, что сохраняется «лептонный заряд», который приписывается легким частицам: электрону, позитрону, электронному нейтрино, электронному антинейтрино. Лепт-

Фундаментальные частицы

	Кварки		Лептоны	
I поколение	u-кварк	d-кварк	электрон	нейтрино электронное
II поколение	c-кварк	s-кварк	мюон	нейтрино мюонное
III поколение	t-кварк	b-кварк	таон	нейтрино таонное
q (заряды)	+2/3	−1/3	−1	0
Цвет (заряды)	синий, красный, зеленый		бесцветные	бесцветные

Взаимодействия				
Цветовое	глюоны			
Электромагнитное	фотон			
Слабое	Z^0-бозон	$W^{\pm}$-бозоны	(Н-бозон Хиггса)	

ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



Основные взаимодействия в микромире

тонный заряд электрона и электронного нейтрино равен +1, у позитрона и электронного антинейтрино он равен −1. Всем остальным частицам (например, нуклонам) приписывается лептонный заряд равный 0.

Окружающий мир «сделан» из частиц I поколения. II и III поколения — короткоживущие частицы. Причина их существования еще не разгадана.

Оказалось, что разные фундаментальные частицы участвуют не во всех взаимодействиях: электромагнитном, цветовом и слабом,— а только в некоторых из них.

Гравитационное взаимодействие имеет место между любыми частицами, являясь «сверхслабым». По этой причине в теории элементарных частиц им пренебрегают.

Известны четыре структурных уровня организации материи: атом — ядро — протон — кварк. В последнее время высказаны предположения о пятом уровне.

Если атом увеличить до размеров Земли, то субчастицы этого уровня увеличатся не более, чем до размеров яблока. Их размеры 10^{-17} ... 10^{-19} см, а полная масса в миллиард раз меньше их же кинетической энергии внутри кварков и лептонов!

Кроме гравитационного в первой половине XX века были известны электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия. Два последних оказались короткодействующими и повторили историю межмолекулярного взаимодействия, отвечающего за образование молекул из атомов. Когда атомы сближаются, их заряженные компоненты «чувствуют» друг друга и образуют связи. Таким же образом сильное (ядерное) — сложный остаточный эффект цветового взаимодействия кварков, «чувствующих» своих заряженных «собратьев» в других нуклонах при достаточном сближении. Новым фундаментальным (т. е. дальнодействующим) взаимодействием является цветовое взаимодействие кварков и глюонов.

Возможно, что и у слабого (ответственного за β-распад и другие превращения частиц) короткодействующего взаимодействия скоро будет открыт «прародитель» — дальнодействующее взаимодействие между составляющими кварки и лептоны субчастицами с парадоксально низкой полной энергией и огромной кинетической.

Это позволяет назвать их частицами с почти нулевой массой и объясняет причину трудности их вычисления и экспериментального обнаружения.

§ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Начиная с 1932 года было открыто более 400 квазиэлементарных частиц.

Этому способствовало бурное развитие экспериментальной техники, чувствительных методов обнаружения частиц и создание мощных ускорителей, позволяющих разгонять частицы до огромных скоростей и затем наблюдать их взаимодействие.

Когда в конце 20-х годов XX века П. Дирак построил релятивистскую теорию движения электрона, стало ясно, что должен существовать антипод электрона — антиэлектрон, получивший название позитрон. Позитрон — «близнец» электрона, у них одинаковая масса, спин, значение электрического заряда. Только знаки зарядов противоположные. В 1932 году позитрон был открыт в космических лучах — излучении которое приходит из космоса и пронизывает земную атмосферу.

С тех пор были обнаружены античастицы у всех, кроме истинно нейтральных (фотон и Z^o), частиц.

Когда сталкиваются медленные электрон и позитрон, происходит их **аннигиляция**. Они превращаются в гамма-кванты. Это явление было предсказано П. Дираком и экспериментально подтверждено Ф. Жолио-Кюри и Ж. Тибо.

Может протекать и обратный процесс — **рождение пары электрон-позитрон**, при столкновении фотона большой энергии с ядром. Энергия такого фотона, в соответствии с законом сохранения энергии, должна быть больше энергии покоя этих двух частиц, то есть более 1,02 МэВ.

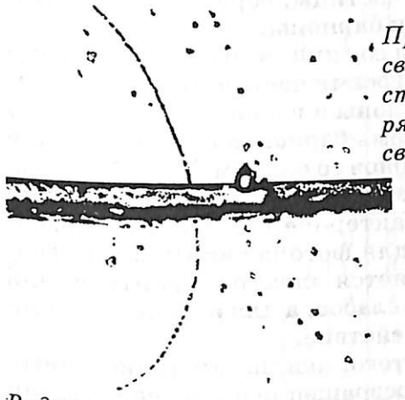
Мы приводим первую фотографию, доказавшую существование позитрона. На другой фотографии запечатлен процесс рождения пары электрон-позитрон в камере Вильсона.

Открывая новую частицу ученые измеряли ее массу, электрический заряд, спин и другие характеристики и одновременно пытались «определить ее место» среди других, уже известных, частиц.

Элементарных частиц оказалось так много, что их пришлось распределить по семействам, используя основные характеристики — массу, электрический заряд и спин частиц.

Первое семейство образует **фотон**. Его масса покоя и электрический заряд равны нулю, а спин равен 1.

Позитрон движется сверху вниз в магнитном поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости фотографии



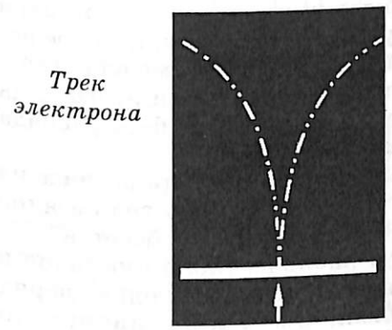
Проходя через свинцовую пластинку, он теряет часть своей энергии

Радиус траектории движения позитрона после прохождения свинцовой пластины изменился, так как его скорость уменьшилась

При аннигиляции пара «электрон-позитрон» превращается в два гамма-кванта

$$e^+ + e^- \to 2\gamma$$

Реакция, обратная аннигиляции:



Поток гамма-квантов падал на свинцовую пластину снизу по нормали к ней

Для рождения пары «электрон-позитрон» необходимы гамма-кванты, энергия которых не меньше суммы энергий покоя этих частиц

$$\gamma \to e^+ + e^-;$$

$$m_e c^2 = 0{,}00055 \text{ а.е.м.} \cdot 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}} \approx 0{,}51 \text{МэВ};$$

$$W_\gamma \geq 2 \cdot 0{,}51 \text{МэВ} \approx 1{,}02 \text{ МэВ}.$$

Лептоны и их характеристики

Название	Символ	Масса, в m_e	Масса, МэВ	Время жизни, с
Электрон, позитрон	e^- e^+	1 1	0,51 0,51	Стабильны
Электронное нейтрино, антинейтрино	ν_e $\tilde{\nu}_e$	0 0	$<5\cdot10^{-5}$ $<5\cdot10^{-5}$	Стабильны
Мю-мезон, антимюон	μ^- μ^+	207 207	105,7 105,7	$2{,}2\cdot10^{-6}$
Мезонное нейтрино, антинейтрино	ν_μ $\tilde{\nu}_\mu$	$>0{,}5$ $>0{,}5$	0, 27 0,27	?
Тау-лептон, антитаон	τ^- τ^+	3492 3492	1784 1784	$<4\cdot10^{-13}$
Таонное нейтрино, антинейтрино	ν_τ $\tilde{\nu}_\tau$	<70 <70	<35 <35	?

Название	Символ	*Спин*, *s*	Заряд, *q*	*L*	*B*
Электрон, позитрон	e^- e^+	1/2 1/2	−1 +1	+1 −1	0 0
Электронное нейтрино, антинейтрино	ν_e $\tilde{\nu}_e$	1/2 1/2	0 0	+1 −1	0 0
Мю-мезон, антимюон	μ^- μ^+	1/2 1/2	−1 +1	+1 −1	0 0
Мезонное нейтрино, антинейтрино	ν_μ $\tilde{\nu}_\mu$	1/2 1/2	0 0	+1 −1	0 0
Тау-лептон, антитаон	τ^- τ^+	1/2 1/2	−1 +1	+1 −1	0 0
Таонное нейтрино, антинейтрино	ν_τ $\tilde{\nu}_\tau$	1/2 1/2	0 0	+1 −1	0 0

$$\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu \qquad 1_\mu = 1_e - 1_e + 1_\mu$$
$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu \qquad -1_\mu = -1_e + 1_e - 1_\mu$$
$$\tau^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau \qquad 1_\tau = 1_\mu - 1_\mu + 1_\tau$$
$$\tau^+ \to \mu^+ + \nu_\mu + \tilde{\nu}_\tau \qquad -1_\tau = -1_\mu + 1_\mu - 1_\tau$$

Второе семейство получило название **лептонов** (от греческого leptos — легкий). В него вошли с античастицами электрон, мю-мезон, тау-мезон, а также их нейтрино (всего 6 + 6 частиц). Их спин равен 1/2.

Третье семейство — **адроны** (от греческого слова hadros — большой, сильный). В него вошли частицы, образующие две ветви: **мезоны** и **барионы**.

Мезоны со спином, равным 0, образуют ветвь из восьми частиц. К барионам относятся нуклоны и гипероны с полуцелым спином: восемь барионов со спином 1/2 и десять барионов со спином 3/2.

Для частиц каждого семейства имеется свое характерное главное взаимодействие. Так для фотона таким взаимодействием является электромагнитное, для лептонов — слабое, а для адронов — ядерное взаимодействие.

Кроме того, анализ многочисленных процессов превращения и рождения частиц позволил обнаружить у частиц каждого семейства специфические свойства, которые мы характеризуем лептонным и барионным зарядом, странностью, изотопическим спином, обладающими свойством сохранения.

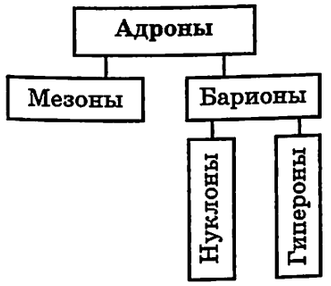
Мы уже неоднократно говорили о том, что превращение элементарных частиц является фактом их существования. Спонтанный распад частиц происходит благодаря особому виду взаимодействия, которое получило название **«слабое взаимодействие»**.

Рассмотрим особенности этого вида взаимодействия на примере бета-распада ядер и распада нейтрона.

Как вы помните, при бета-распаде из ядра вылетает электрон. Но ведь в ядре электронов нет. Откуда же он берется?

При бета-распаде число нуклонов в ядре не меняется, меняется только заряд ядра — он увеличивается на единицу, то есть число протонов увеличивается на единицу, а число нейтронов — уменьшается на единицу. Следовательно, внутри нестабильного ядра нейтрон может распадаться, превращаясь в протон и электрон. Протон остается в ядре, а электрон выбрасывается из ядра, так как нахождение в нем запрещает соотношение неопределенностей.

Но вот что странно: совершенно одинаковые ядра испускают электроны различной энергии. При этом образуются совершенно одинаковые же ядра. Налицо явное противоречие закону сохранения энергии!



Адроны и их характеристики

Название	Символ	Масса, в m_e	Спин *s*	Заряд *q*	Заряд *B*	Странность *S*	Время жизни, с
Пи-мезон (пион)	π^+	273	0	+1	0	0	$2{,}6\cdot10^{-8}$
	π^-	273	0	−1	0	0	$2{,}6\cdot10^{-8}$
	π^0	264	0	0	0	0	$\sim0{,}8\cdot10^{-8}$
К-мезон (каон)	K^+	966	0	+1	0	+1	$1{,}2\cdot10^{-8}$
	K^-	966	0	−1	0	+1	$1{,}2\cdot10^{-8}$
	K^0	965	0	0	0	+1	$5\cdot10^{-8}$
Протон	p	1836	1/2	+1	+1	0	стабилен
Нейтрон	n	1838	1/2	0	+1	0	900
Кси	Ξ^-	2590	1/2	−1	+1	−2	$1{,}6\cdot10^{-10}$
	Ξ^0	2578	1/2	0	+1	−2	$2{,}9\cdot10^{-10}$
Сигма	Σ^+	2325	1/2	+1	+1	−1	$0{,}8\cdot10^{-10}$
	Σ^-	2341	1/2	−1	+1	−1	$1{,}5\cdot10^{-10}$
	Σ^0	2324	1/2	0	+1	−1	$<10^{-20}$
Лямбда	Λ^0	2182	1/2	0	+1	−1	$2{,}6\cdot10^{-10}$

Взаимодействие / Название частицы			Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитационное
Фотон			–	+	–	+
Лептоны		Электрон	–	+	+	+
		Мюон	–	+	+	+
		Таон	–	+	+	+
		Нейтрино	–	–	+	+
Адроны	*Мезоны*	Пи-мезон	+	+	+	+
		K-мезон	+	+	+	+
	Барионы	Протон	+	+	–	+
		Нейтрон	+	–	+	+
		Кси	+	+	+	+
		Сигма	+	+	+	+
		Лямбда	+	+	+	+

Чтобы «спасти» закон сохранения энергии швейцарский физик В. Паули предположил, что при распаде нейтрона появляется «частица-невидимка» — нейтрино (в действительности, антинейтрино) — она и уносит с собой недостающую энергию. Эта частица не взаимодействует с веществом, так как ее электрический заряд равен нулю и масса покоя почти равна нулю. По оценкам ученых ее свободный пробег в плотной материи 10^{17} м.

В дальнейшем оказалось, что многие частицы, распадаясь, испускают нейтрино или антинейтрино. В этих процессах ясно видна суть превращений элементарных частиц. Они не сводятся к разъединению сложной системы на составные части: ведь нейтрино не может находиться внутри частицы, ибо движется со скоростью почти *c*!

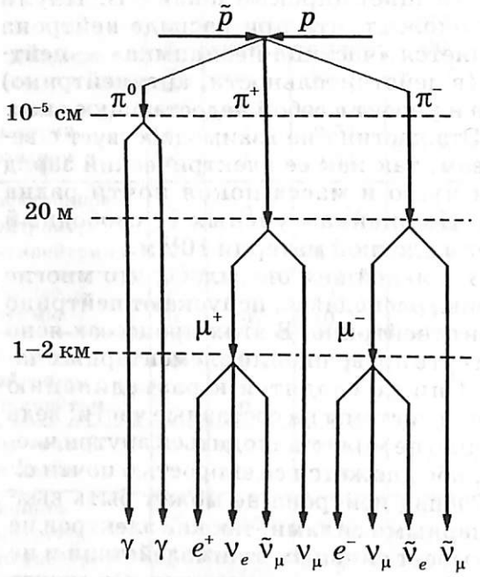
Распад нейтрона не может быть вызван ядерными силами, так как электрон не испытывает сильных взаимодействий и не может быть рожден за их счет. Он может появиться в электромагнитном взаимодействии (так рождается пара электрон-позитрон). Но нейтрино — не имеет электрического заряда, и поэтому не участвует в электромагнитном взаимодействии. Следовательно, должно быть другое взаимодействие, ответственное за распад нейтрона, бета-распад и распад других частиц с участием нейтрино. Это взаимодействие называется слабым.

Из-за малого значения слабое взаимодействие не оказывает влияния на движение частиц, не способно удержать их друг около друга. Но зато оно способно «родить» или «уничтожить» частицы, выполняя эту свою функцию медленно (по меркам времени в мире элементарных частиц), но неукоснительно!

Это взаимодействие — не уникальное, ему подвержены все частицы без исключения. Просто для адронов, частиц способных к ядерному взаимодействию, оно несущественно, проявляется очень слабо. Зато нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях (и гравитационных). Поэтому все процессы, в которых появляются или превращаются нейтрино, наверняка вызваны слабыми взаимодействиями.

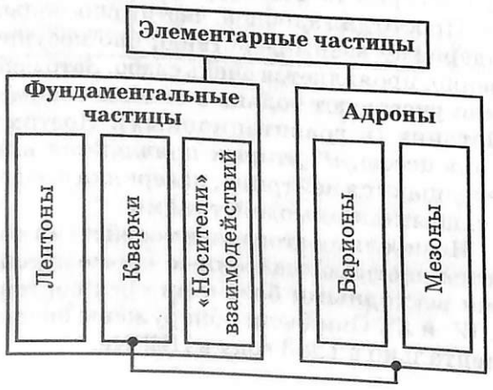
Носителями этого взаимодействия являются частицы, названные **промежуточными векторными бозонами** трех сортов: W^+, W^- и Z^0. Они были обнаружены экспериментально в 1983 году в ЦЕРНе.

§ 22. СТРУКТУРА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. КВАРКИ



При аннигиляции протона и антипротона могут образоваться два гамма-кванта, но чаще появляются пи-мезоны, которые затем тоже распадаются. Таким образом, в результате аннигиляции пары протон-антипротон рождается десять частиц и среди них только лептоны и гамма-кванты («переносчики» электромагнитного взаимодействия).

М. Гелл-Манн
1929



Изобилие элементарных частиц уже давно не радует, а озадачивает физиков-теоретиков. Поэтому они стали пытаться найти «праматерию» или «прачастицы», чтобы все обилие уже открытых и вновь, и вновь открываемых частиц получалось из комбинаций нескольких — «истинно элементарных» или субэлементарных частиц.

Основания для этого имеются. Дело в том, что ученые провели опыты по рассеянию быстрых электронов на протонах и нейтронах. По своей сути эти опыты похожи на опыты Резерфорда, в которых рассеяние альфа-частиц на атомах позволило установить наличие атомного ядра в них.

Опыты по рассеянию электронов на протонах и нейтронах позволили обнаружить, что у этих частиц электрический заряд пространственно распределен.

Когда же увеличили энергию электронов до 50 МэВ, а затем использовали в качестве «снарядов» нейтрино, то внутри этих частиц — протонов и нейтронов — обнаружили массивные точечные центры.

Так подтвердилась **кварковая структура** нуклонов, которая была теоретически предсказана американскими физиками-теоретиками М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом. Суть гипотезы, высказанной этими учеными, состоит в том, что адроны, то есть частицы, участвующие в сильном взаимодействии, состоят из более фундаментальных частиц — **кварков**.

Субэлементарных частиц немного, но зато их свойства оказались крайне необычными. Первоначально была высказана гипотеза о существовании трех кварков и трех антикварков. Их обозначают буквами u, d и s (от английских слов up, down, и strange). Кварки имеют дробные электрические заряды: u- кварк имеет положительный заряд $+2/3$ элементарного заряда, а кварки d и s — отрицательные, равные $-1/3$ элементарного.

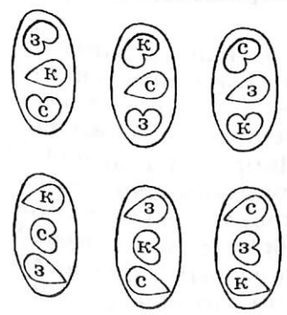
Тогда протон состоит из двух u-кварков и одного d-кварка (uud). Нейтрон состоит из одного u-кварка и двух d-кварков (ddu). Мезоны состоят из комбинаций кварк-антикварк, странные частицы (каоны и гипероны) содержат странный кварк s, и так далее.

Впоследствии были предсказаны, а затем и экспериментально обнаружены c-кварк (charmed — очарованный) и еще более массивные кварки b и t (соответственно от beauty — красота и truth — правда).

Название	Комбинация кварков	Электрический заряд	Барионный заряд
Протон	uud	$\frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=1$	$\frac{1}{3}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=1$
Нейтрон	ddu	$\frac{2}{3}-\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$	$\frac{1}{3}+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=1$
π^+ - мезон	$\tilde{d}u$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}=1$	$-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=0$
π^- - мезон	$d\tilde{u}$	$-\frac{1}{3}-\frac{2}{3}=-1$	$-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=0$
π^0 - мезон	$\tilde{u}u$ / $d\tilde{d}$	$-\frac{2}{3}+\frac{2}{3}=0$	$\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$
K^+ - мезон	$u\tilde{s}$	$\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=1$	$\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$
K^0 / $\tilde{K}^0$ мезон	$d\tilde{s}$ / $s\tilde{d}$	$-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=0$	$\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$
K^- - мезон	$s\tilde{u}$	$-\frac{1}{3}-\frac{2}{3}=-1$	$\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$

Кварки и их свойства

Тип (аромат)	Верхний	Нижний	Странный	Очарованный	Красивый	Правдивый
Символ	u	d	s	c	b	t
Спин	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Электрический заряд	2/3	−1/3	−1/3	2/3	−1/3	+2/3
Странность	0	0	−1	0	0	0
Очарование	0	0	0	1	0	0
Барионный заряд	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Масса, МэВ ГэВ	4	7	150	1,5	4,5	175



«Бесцветные» нуклоны состоят из кварков разного цвета. «Бесцветную» комбинацию могут дать либо три кварка, либо кварк с антикварком, которые имеют дополнительные цвета.

Так как из кварков построены адроны, то всем им следует приписать барионный заряд. Он тоже оказался дробным и равным 1/3. Кроме того, все кварки имеют спин равный 1/2.

Таким образом, из кварков, как из кубиков, стали «собирать» все известные адроны. При этом оказалось, что кварки объединяются между собой либо только парами «кварк-антикварк» (мезоны), либо тройками (барионы). Возникает вопрос: почему не существует частиц из двух или четырех кварков?

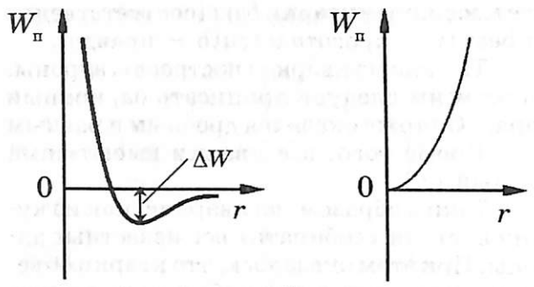
Возник и другой вопрос. При «наборе» из кварков некоторых частиц, например, гиперона Ω^-, получалось, что они состоят из трех одинаковых s-кварков, находящихся в одном состоянии, что строго запрещается принципом Паули (для частиц $s=1/2$).

Тогда ученые предположили, что у кварков есть еще одно свойство, его назвали «цветом». Каждый кварк может находиться в трех различных состояниях. Они совершенно идентичны, но отличаются только цветом. Кварки могут быть красными, зелеными и синими. (Вы, конечно, понимаете, что к привычному нам цвету «цвет» кварков не имеет никакого отношения! Это не более, чем условное название некоторого свойства, которое не может быть описано в привычных для нас терминах. Кстати, определенный тип кварка часто именуют «ароматом». Так что, кварки различаются по цвету и аромату.) Антикварки имеют цвета, дополнительные к цветам кварков: сине-зеленый, красно-синий и красно-зеленый.

Чтобы ответить на поставленные выше вопросы (в рамках допущения о цвете кварков), был сформулирован **«принцип бесцветности»**: все адроны должны быть бесцветными или белыми, ведь цвета среди их свойств мы не отмечали. Значит, каждый барион должен состоять из кварков разных цветов (при смешении этих основных цветов образуется белый цвет). Тогда мезоны тоже получаются бесцветными, так как цвета соответствующих кварка и антикварка — дополнительные.

Два или четыре кварка не могут составить бесцветную комбинацию, поэтому они и не существуют.

Гипотеза цветных кварков получила экспериментальное подтверждение.

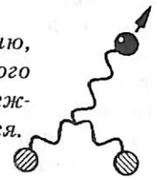


Если зависимость потенциальной энергии взаимодействия двух частиц от расстояния между ними имеет такой вид, то для отделения одной из частиц достаточносообщить ей энергию ΔW.

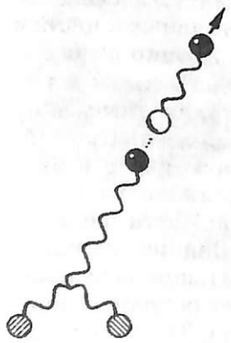
Если зависимость потенциальной энергии взаимодействия двух частиц от расстояния между ними имеет такой вид, то отделить одну частицу от другой невозможно принципиально.

Кварковая модель протона

Если d-кварку сообщить энергию, например, при помощи быстрого электрона, то «расстояние» между ним и u-кварками увеличится.



Когда при удалении кварка из нуклона потенциальная энергия достигнет некоторого значения, за счет нее начнут образовываться пары «кварк – антикварк»



Расходуя энергию на образование пары «кварк –антикварк», кварк восстанавливает протон, а кварк с антикварком, объединяясь, образуют мезон.

Массы кварков можно приблизительно оценить, исходя из таких соображений. Массы протона (*uud*) и нейтрона (*ddu*) примерно равны и составляют приблизительно 900 МэВ. Значит, можно считать, что масса каждого из составляющих их кварков чуть больше 300 МэВ.

Странный кварк *s* входит в состав лямбда-гиперона, масса которого примерно на 180 МэВ больше массы протона. Следовательно, можно допустить, что *s*-кварк имеет массу около 500 МэВ. Аналогично оценивается и масса других кварков.

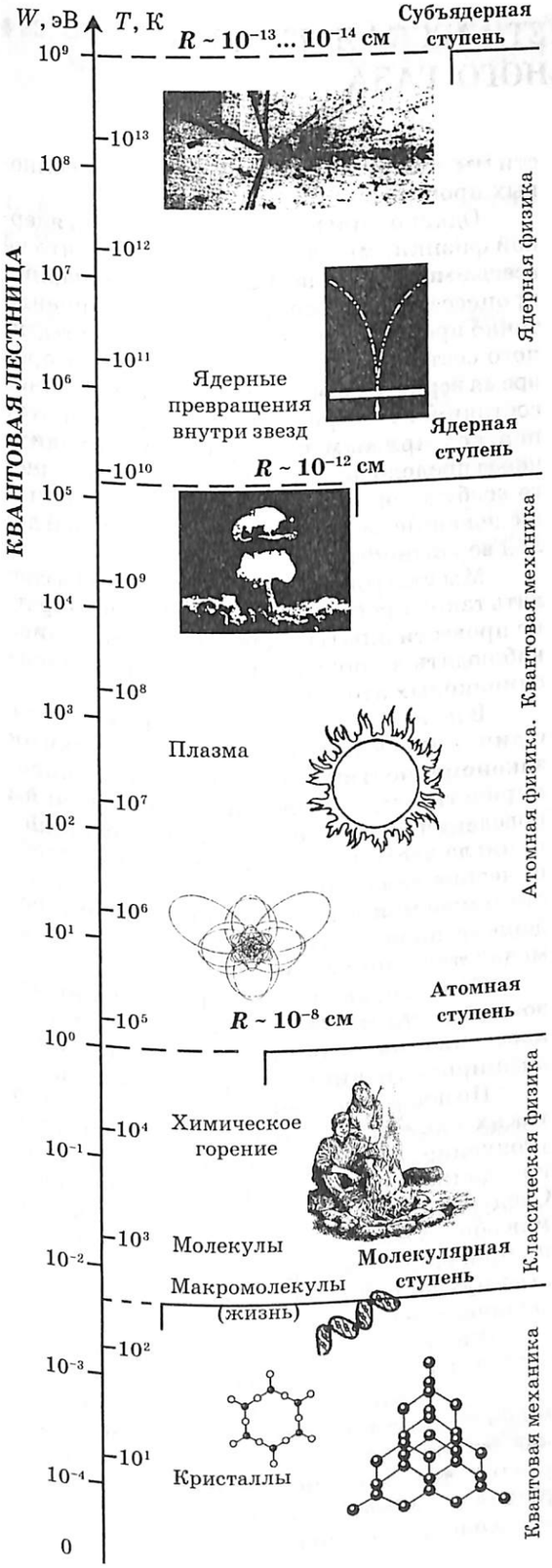
Но только оценивается, так как экспериментально измерить массу кварков пока не удается, так как **кварки не наблюдаются в свободном состоянии**. Хотя все адроны состоят из кварков, но расщепить их на кварки не удается, даже с помощью самых мощных ускорителей частиц.

Объяснение этого явления пока гипотетично, но можно допустить, что межкварковые силы, в отличие от всех других сил в природе, не убывают с расстоянием между частицами, а остаются постоянными или даже увеличиваются. По современным оценкам, чтобы удалить один кварк от протона на расстояние 3 см потребует около 10^{13} МэВ энергии!

Но... Прежде чем один кварк начнет удаляться от других, начнет действовать механизм рождения частиц! За счет значительной энергии, подводимой к нуклону, образуется пара «кварк-антикварк», которая составляет мезон. Отделяемый от нуклона кварк восстанавливает его, и вместо удаления кварка происходит рождение мезона. Именно это и наблюдается на опыте: при облучении протонов быстрыми электронами образуются направленные пучки, состоящие из большого числа адронов, называемых **струями**. Измерение характеристик струй позволяет судить о значениях основных характеристик кварков, например об их спине, электрическом и барионном заряде.

Кварки внутри адронов взаимодействуют друг с другом. Это взаимодействие следует отнести к сильному, иначе адроны можно было бы расщепить на составляющие их кварки. Теория этих взаимодействий получила название **хромодинамики**.

Согласно этой теории, кварки внутри адронов постоянно движутся и взаимодействуют, обмениваясь особыми цветными частицами — **глюонами**. Подобно фотонам



глюоны не имеют электрического заряда и массы покоя. При обмене глюонами кварки меняют свой цвет, но не аромат. Например, красный *d*-кварк испускает глюон и превращается в синий или зеленый *d*-кварк. Обмен глюонами происходит так, что адрон все время остается бесцветным.

Так сильное взаимодействие глюонов друг с другом и кварками приводит к удержанию кварков и глюонов внутри адронов.

Но адроны участвуют также и в слабых взаимодействиях. Это означает, что и кварки должны участвовать в нем. Вспомним, что при слабом взаимодействии частицы обмениваются промежуточными бозонами. И если глюоны меняют только цвет кварка, сохраняя его аромат, то следует допустить, что при обмене промежуточными бозонами изменяется аромат кварка, то есть почти все его свойства.

Например, один из двух *d*-кварков нейтрона, испуская отрицательный W^--бозон, превращается в *u*-кварк. В результате образуется протон. А W^--бозон распадается на лептоны: электрон и антинейтрино. Таким образом, слабые взаимодействия осуществляют связь между кварками и лептонами, которые на сегодняшний день принято называть «фундаментальными».

Завершая обсуждение вопросов об элементарных частицах, сделаем некоторое важное заключение.

Внутренняя структура материи обнаруживает удивительную особенность, которую можно назвать Квантовой Лестницей. Каждая ступень этой Лестницы имеет отношение к определенному кругу явлений и представляет собой отдельную область физики. Каждая такая ступень отличается от соседних совершенно разными по порядку величины энергиями переходов и, следовательно, разными по размерам областями доступных движений.

Переход на более глубокую ступень требует значительно больших энергий и уменьшает размеры исследуемой области. При этом объекты, которые на предыдущей ступени считались бесструктурными, на новой обнаруживают свою структуру. Так атом является элементарной частицей в молекулярной физике, ядро — в атомной, протон — в ядерной, кварк — в квантовой хромодинамике.

На каждой ступени объекты обнаруживают новые свойства. Незыблемыми остаются лишь Великие Законы Сохранения.

МОЛЕКУЛЯРНО - КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Окружающий человека мир, воспринимаемый им через ощущения, состоит из макроскопических объектов. Размеры большинства этих тел огромны по сравнению с размерами атома, но сравнимы (по порядку величины) с размерами человека.

Эти объекты состоят из громадного для человека числа атомов и молекул, мир их чрезвычайно разнообразен и многолик. Он включает в себя газы, жидкости, твердые тела, плазму, многочисленные биологические организмы.

Изучением этих объектов занимаются естественные науки: молекулами и их превращениями — химия, представителями животного и растительного миров — биология, строением земной коры и Земли — геология и т. п.

Роль физики заключается в установлении наиболее общих, фундаментальных законов, лежащих в основе всего сущего, описывающих и характеризующих любые макроскопические системы.

Таким образом, главная задача состоит в том, чтобы, исходя из сравнительно небольшого числа физических законов, прийти к пониманию наблюдаемого на опыте разнообразия явлений и объектов.

До сих пор, например, при изучении механики и электродинамики, мы изучали поведение (движение) материальных точек и точечных зарядов. Прибегая к идеализации, мы отвлекались от тех свойств реальных тел, которые в этих явлениях существенной роли не играли (однако, это не означает, что эти свойства вообще не важны).

Рассматриваемые в рамках этих теорий физические системы были сравнительно простыми. Например, мы изучали движение одного, реже — двух и более тел под действием нескольких сил; движение точечного заряда в электрическом поле; проводника с током — в магнитном поле.

Для описания поведения этих систем мы опирались на **динамические закономерности**: отыскивая причину изменения в характере движения материальной точки или точечного заряда, мы предсказывали однозначно дальнейшее поведение системы (то есть следствия).

Похожие динамические закономерности мы обнаружили и при изучении волновых процессов.

Однако, при изучении атомной и ядерной физики, мы столкнулись с тем, что не всегда можем точно написать «сценарий» процесса. Например, можно совершенно точно предсказать, что атом из возбужденного состояния (с $n \geq 3$) через некоторое время вернется в основное, невозбужденное состояние. Но предсказать, будет ли этот переход прямым или будет происходить через последовательные переходы из одного возбужденного состояния в другие, нижележащие, можно только с некоторой долей вероятности.

Мы уже говорили: для того, чтобы сделать такой прогноз, нужно либо многократно провести опыты с данным атомом, либо наблюдать за поведением большого числа одинаковых атомов.

В подобных случаях мы имеем дело не с динамическими, а со **статистическими закономерностями**. Именно такие закономерности следует ожидать при описании поведения систем, состоящих из огромного числа частиц, ведь типичные макроскопические тела (системы), с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, содержат порядка 10^{23} движущихся и взаимодействующих атомов.

Конечно, как всегда, при изучении нового объекта мы будем опираться на уже известные нам законы физики, пытаясь расширить границы их применимости.

Но поскольку речь пойдет об изучении таких сложных систем, то потребуется уточнение привычных нам понятий, таких как движение, взаимодействие, энергия. Следует также ожидать, что у системы атомов обнаружатся новые свойства, которые не присущи отдельному атому. Эти свойства нужно будет изучить и ввести новые физические величины для их описания.

Физическая теория, которая изучает особую форму движения материальных частиц — тепловое движение — называется молекулярно-кинетической теорией. Так как тепловое движение имеет всеобщий характер, то эта теория поможет нам разобраться в многообразии явлений окружающего нас макромира.

§ 23. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО - КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

1. Вещество (и всякое тело из него) состоит из частиц;

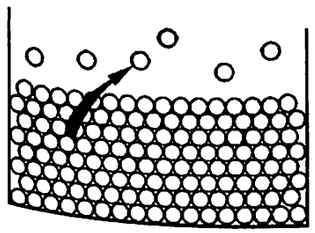
2. Частицы совершают тепловое движение;

3. Частицы взаимодействуют между собой.

Границы применимости МКТ

1. Рассматриваются только системы, состоящие из большого числа частиц, $N \sim 10^{20} \ldots 10^{26}$;

2. Температурный интервал, в котором молекулы и атомы можно считать неделимыми бесструктурными частицами:
для молекул T–1000 ... 3000 К,
для атомов T – 10000 К.



Косвенные подтверждения существования частиц вещества:

1. Опыты по дроблению вещества;
2. Опыты по разбавлению растворов;
3. Опыты по испарению и возгонке вещества;
4. Закон постоянства состава химических соединений (в химических опытах);
5. Закон кратных отношений (в химических опытах);
6. Закон Авогадро (в химических опытах).

*Закон Авогадро: **равные объемы разных газов при одинаковых давлениях и температурах содержат одно и то же число частиц** — позволил разработать химические методы измерения относительных атомных и молекулярных масс.*

Молекулярно-кинетическая теория исходит из трех основных положений, которые можно сформулировать одной фразой: все тела состоят из движущихся хаотично и взаимодействующих частиц.

Первое положение — это положение о том, что **все тела состоят из частиц**. Для вас, живущих в XXI веке и уже изучивших атомную и ядерную физику, это положение является очевидным. Однако, приступая к изучению новой теории, уточним о каких частицах пойдет речь.

Поскольку мы собираемся описать мир окружающих нас макроскопических тел, то мы находимся на той ступеньке квантовой лестницы, где характерные значения энергии существенно меньше той, которая нужна для разделения атома на отдельные части.

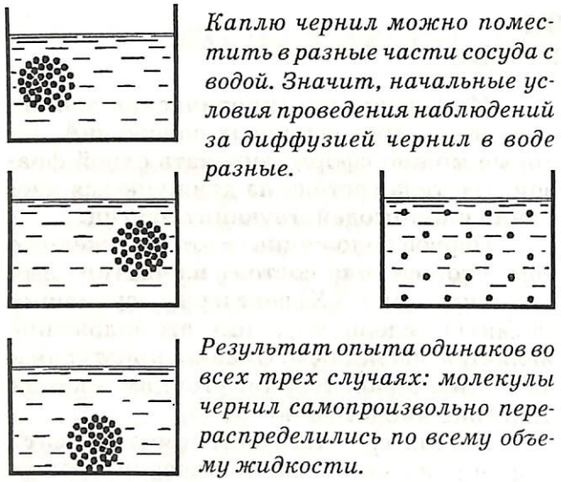
Следовательно, в этих процессах атом выступает как неделимая частица.

В большинстве случаев, которые мы будем рассматривать, молекулы веществ (например, молекулы воды или газов, составляющих атмосферу) тоже не разрушаются. Крупные органические молекулы, которые при нагревании даже в сравнительно небольшом интервале температур могут разорваться на части, мы рассматривать не предполагаем.

Значит, **в рамках МКТ атомы и молекулы можно считать неделимыми (бесструктурными) частицами.**

Среди опытов, которые лежат в основании этого положения, назовем опыты по дроблению твердых веществ и разбавлению растворов; опыты, связанные с испарением жидкостей и возгонкой твердого вещества (например, нафталина, йода, сухого льда).

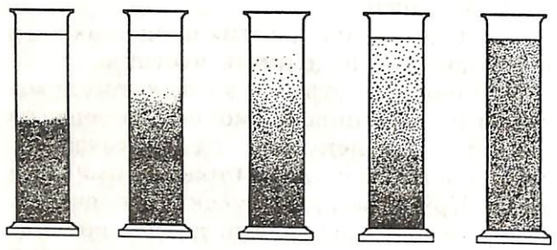
Эти опытные факты долгое время оставались **косвенными подтверждениями** существования частиц вещества. С тех пор, как была проведена оценка размеров структурных частиц вещества (например, методом оценки толщины масляной пленки по площади пятна, образовавшегося при растекании известного объема масла по поверхности воды), а затем проведены измерения линейных размеров молекул и атомов при помощи ионного проектора, электронного микроскопа и других современных измерительных устройств, получены **прямые доказательства** их существования.



Каплю чернил можно поместить в разные части сосуда с водой. Значит, начальные условия проведения наблюдений за диффузией чернил в воде разные.

Результат опыта одинаков во всех трех случаях: молекулы чернил самопроизвольно перераспределились по всему объему жидкости.

Тепловое состояние макроскопической системы не зависит однозначно от начальных условий.



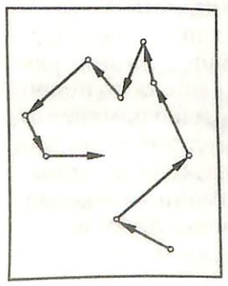
Диффузия

1. Явление самопроизвольного перемешивания разнородных веществ, приведенных в контакт.

2. Происходит в газах, жидкостях и твердых телах.

3. Скорость диффузии зависит (при прочих равных) от температуры. С ростом температуры скорость диффузии увеличивается.

4. Скорость диффузии при одинаковой температуре зависит от агрегатного состояния вещества: в газах скорость диффузии больше, чем в жидкости; а в жидкости больше, чем в твердом теле (при прочих равных).



Последовательные положения броуновской частицы, зафиксированные через равные промежутки времени, соединены отрезками. Стрелками показано направление движения частицы в течение каждого промежутка времени между наблюдениями.

Второе положение молекулярно-кинетической теории утверждает, что частицы вещества находятся в постоянном хаотическом движении — участвуют (или совершают) в **тепловом движении**. Тепловому движению, в отличие от механического, присущи следующие черты. Во-первых, тепловое движение — это хаотическое движение огромного числа частиц, несводимое к механическому движению каждой отдельной частицы этой системы. Во-вторых, любое будущее состояние этой системы не определяется однозначно начальными условиями.

О наличии движения частиц вещества можно косвенно судить по явлению **диффузии**: самопроизвольному перемешиванию разнородных веществ (газов, жидкостей или твердых тел), приведенных в контакт. Однако, сам факт диффузии не является прямым доказательством хаотичности движения. Ведь фактом является только то, что молекулы пахучего вещества, пролитого на столе, оказались, спустя некоторое время, в противоположном конце помещения: туда они могли бы попасть, двигаясь и прямолинейно.

Явление диффузии стало прямым доказательством хаотичности теплового движения, когда были измерены скорости движения молекул при разных температурах. Значения скоростей оказались порядка сотен метров в секунду. Двигаясь с такими скоростями, молекулы пахучего вещества должны были бы оказаться в других частях помещения практически мгновенно. Однако, это не так, и каждый из вас знает это по своему опыту.

Следовательно, чтобы объяснить скорость диффузии, сопоставляя ее со скоростями движения молекул, нужно допустить, что в процессе теплового движения молекулы многократно меняют направление своего движения, то есть движутся хаотично.

Но наиболее убедительным прямым опытным фактом, подтверждающим хаотический характер теплового движения и зависимость его от температуры, является **броуновское движение**.

Наблюдая в микроскоп за движением взвешенных в жидкости мелких частиц вещества (не молекул!), Броун обнаружил, что каждая такая частица совершает хаотическое движение. Фиксируя положения частицы в поле зрения микроскопа через равные промежутки времени и соединяя их

Модель броуновского движения позволяет представить себе реальную картину:

$d_{\text{броун. част.}} \gg d_{\text{молекулы}}$;

$m_{\text{броун. част.}} \gg m_{\text{молекулы}}$.

Закономерности броуновского движения:

1. Движение никогда не прекращается. Оно вечно (например, оно наблюдается в жидких включениях кварца, которым насчитывается тысячи лет);

2. Движение самопроизвольное;

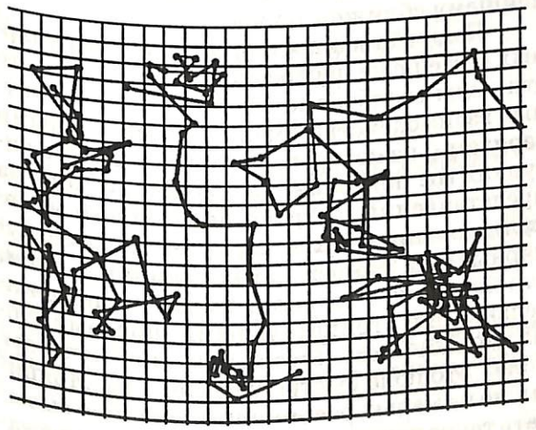
3. Интенсивность движения в вязких жидкостях меньше, чем в менее вязких (при прочих равных);

4. Интенсивность движения зависит от температуры. Она увеличивается с ростом температуры (при прочих равных);

5. В одной и той же жидкости при одинаковых температурах броуновские частицы меньших размеров движутся в среднем быстрее;

6. Движения броуновских частиц происходят независимо друг от друга;

7. Если размеры и форма броуновских частиц близки, то в одной жидкости при одинаковых температурах интенсивность их движения не зависит от вещества (плотности вещества) броуновской частицы.



Один из оригинальных рисунков Ж. Перрена, длина 16 клеток составляет 50 мкм, диаметр броуновской частицы равен 0,53 мкм.

между собой, можно получить представление о траектории движения частицы.

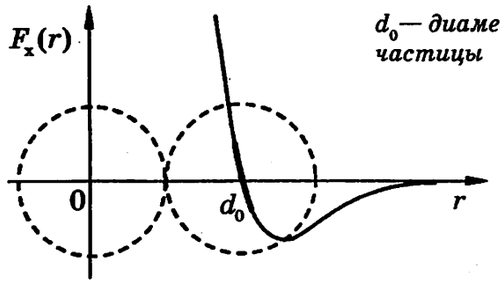
Получается ломаная линия, которая не обнаруживает хотя бы какую-нибудь закономерность в направлении изломов.

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана Эйнштейном в 1905 году. Согласно этой теории взвешенные в жидкости частицы вещества приходят в движение из-за ударов, которые производят по ним движущиеся молекулы. Поскольку молекулы «окружают» частицу со всех сторон, то объяснить, почему она «не дрожит на месте», а движется, можно только допустив, что суммарный импульс совокупных ударов молекул жидкости о броуновскую частицу не равен нулю. Такое возможно, если броуновская частица испытывает разное число ударов с двух противоположных сторон,то есть сами молекулы в жидкости движутся хаотически.

А. Эйнштейн описал броуновское движение количественно, получив формулу, которая связывала средний квадрат смещения броуновской частицы со временем ее движения, температурой, размерами частицы и характеристиками жидкости. В полученное уравнение входила также постоянная Больцмана.

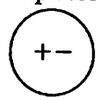
Эта формула со всей возможной тщательностью была проверена экспериментально французским физиком Ж. Перреном в 1908 г. Перрен отмечал через каждые 30 с последовательные положения броуновской частицы в поле зрения микроскопа. Затем соединял эти положения прямолинейными отрезками и измерял проекции этих перемещений на произвольно выбранное направление. Затем вычислял квадраты этих проекций и находил их среднее значение. Так как род жидкости, температура и размер броуновских частиц были известны, оказалось возможным найти опытным путем значения универсальных постоянных Больцмана и Авогадро. А так как полученные в описанных опытах значения этих постоянных совпали (в пределах экспериментальных погрешностей) с их значениями, полученными другими способами, то опыты Перрена стали экспериментальным подтверждением теории броуновского движения.

Третье положение молекулярно-кинетической теории обращает нас к вопросу о взаимодействии частиц, из которых построено вещество. Это положение также не

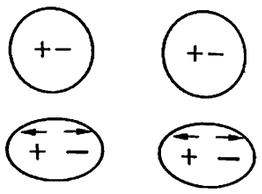


Если $r > d_0$, то между молекулами действует сила притяжения.
Вблизи $r = d_0$ силы молекулярного взаимодействия в среднем равны нулю.
При $r < d_0$ силы молекулярного взаимодействия становятся силами отталкивания.

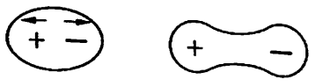
Неполярные молекулы — центры расположения зарядов противоположного знака практически совпадают. Вблизи молекулы существует слабое электрическое поле.



Даже слабое электрическое поле приводит к поляризации соседней молекулы.

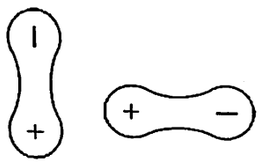


В результате молекулы притягиваются друг к другу



Полярные молекулы могут поляризовать соседнюю неполярную молекулу. В этом случае также возникают силы взаимного притяжения.

Полярные молекулы — центры расположения зарядов противоположных знаков не совпадают. Вблизи диполя существует электрическое поле.



Поле одной полярной молекулы ориентирует другую полярную молекулу, располагая ее вдоль оси диполя. Возникают силы притяжения молекул.

вызывает сомнений и имеет достаточное количество опытных подтверждений.

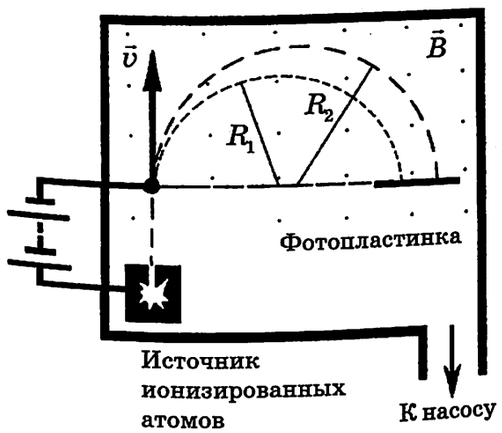
Сам факт возможности существования вещества при определенных условиях в трех разных агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом, является тому доказательством. Раз движущиеся молекулы не разлетаются в разные стороны, а образуют твердое тело или жидкость, которые сохраняют собственный объем, значит, есть силы, удерживающие молекулы вблизи друг друга.

Исследователи сравнительно давно установили, что эти силы (силы межмолекулярного взаимодействия) обнаруживают себя на расстояниях, сравнимых с размерами самих молекул или атомов, и зависят от расстояния между частицами. При этом обращает на себя внимание двойственный характер сил. Когда расстояние между частицами, первоначально находящимися на большом удалении друг от друга, уменьшается, частицы сначала слабо, а затем все сильнее притягиваются друг к другу. При дальнейшем уменьшении расстояния силы межмолекулярного взаимодействия начинают ослабевать и практически становятся равными нулю на расстоянии порядка размера (диаметра, если частицы считать маленькими шариками) частиц.

Дальнейшее уменьшение расстояния между частицами приводит к резкому увеличению сил межмолекулярного взаимодействия. При этом силы носят характер сил отталкивания, они препятствуют дальнейшему сближению частиц.

Количественная теория межмолекулярных сил еще не построена. Однако ясно, что эти силы сводятся к силам электромагнитных взаимодействий между элементарными зарядами, из которых состоят атомы. На рисунках мы показали, как можно, исходя из представлений о строении атомов (и молекул), пояснить такой характер межмолекулярных сил. Это связано, по-видимому, с тем, что электрические поля, созданные положительными и отрицательными зарядами атома, не дают в результате сложения «нулевое» поле. Это поле быстро убывает с расстоянием, но на малых расстояниях способно вызывать такое перераспределение заряда в соседнем атоме, которое приводит к появлению сил притяжения. На меньших расстояниях начинают взаимодействовать электронные оболочки атомов, что приводит к появлению значительных сил отталкивания.

§ 24. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ, РАЗМЕРОВ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ



Относительная масса атома

1. Обозначение: M_r;

2. Число, показывающее, во сколько раз масса данного атома больше 1/12 массы атома углерода-12:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$$

где m_0 — масса атома; m_{0C} — масса атома углерода-12.

3. Относительная масса атома — безразмерная величина: $[M_r] = 1$.

4.

$$\frac{1}{12} m_{0C} \equiv 1 \text{ а.е.м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Расчет относительной массы молекулы

1. Формула молекулы: $CuSO_4$.

2. Относительные массы всех атомов в составе молекулы (из периодической системы):

$m_{0Cu} = 64$; $m_{0S} = 32$; $m_{0O} = 16$.

3. Относительная масса молекулы равна сумме относительных масс всех атомов, входящих в ее состав: $M_r = 160$.

4. Удобная форма записи:

$$\overbrace{M_r = 1 \cdot 64 + 1 \cdot 32 + 4 \cdot 16 = 160}^{CuSO_4}$$

Для построения количественной теории необходимо знание характеристик (или параметров) объектов, поведение которых предполагается рассматривать. В нашем случае основные объекты — это атомы или молекулы (или структурные частицы) различных веществ.

Поэтому опытное определение их массы, размеров и скоростей молекул может служить прямым доказательством их существования.

Измерение массы атомов и молекул — одинаково важная проблема и для физики, и для химии. Сегодня возможны прямые измерения массы при помощи масс-спектрометров. С устройством этих приборов мы уже знакомились ранее.

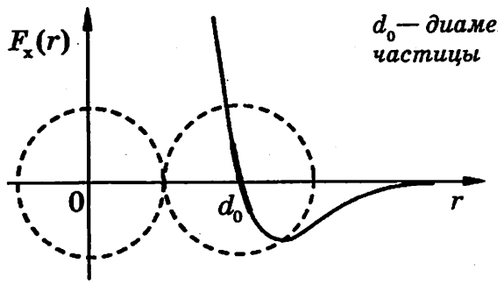
Однако, первые способы измерения массы структурных частиц вещества появились в химии. Эти способы основаны на сравнении масс атомов разных химических элементов между собой.

В качестве «эталона» массы в химии принята1/12 массы атома углерода-12. Этому есть две причины. Первая связана с тем, что углерод входит в огромное число самых разных (в том числе органических соединений). Вторая — с тем, что при таком выборе «эталона» массы атомов большинства химических элементов оказываются близкими к целым числам.

Поскольку при данном подходе ищут во сколько раз масса какого-то атома больше 1/12 массы атома углерода, то полученное число является, во-первых, отношением и поэтому называется **относительной массой атома**, во-вторых, эта величина — безразмерная.

Относительные массы атомов всех химических элементов точно измерены и приведены в специальных таблицах. Значения относительных масс атомов приведены также в периодической системе Менделеева, ведь это важнейшая характеристика атома. Округляя значения массы атома до целого числа, мы определяли массовое число ядра в ядерной физике.

Зная относительную массу атома, нетрудно подсчитать относительную массу любой молекулы. Для этого нужно воспользоваться свойством аддитивности массы. Это свойство массы в химических превращениях выполняется достаточно строго. Не

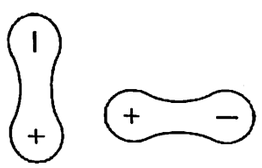


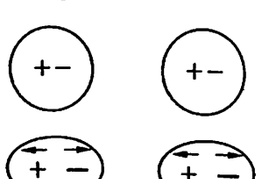
Если $r > d_0$, то между молекулами действует сила притяжения.
Вблизи $r = d_0$ силы молекулярного взаимодействия в среднем равны нулю.
При $r < d_0$ силы молекулярного взаимодействия становятся силами отталкивания.

Неполярные молекулы — центры расположения зарядов противоположного знака практически совпадают. Вблизи молекулы существует слабое электрическое поле.

Полярные молекулы — центры расположения зарядов противоположных знаков не совпадают. Вблизи диполя существует электрическое поле.

Даже слабое электрическое поле приводит к поляризации соседней молекулы.





В результате молекулы притягиваются друг к другу

Поле одной полярной молекулы ориентирует другую полярную молекулу, располагая ее вдоль оси диполя. Возникают силы притяжения молекул.

Полярные молекулы могут поляризовать соседнюю неполярную молекулу. В этом случае также возникают силы взаимного притяжения.

вызывает сомнений и имеет достаточное количество опытных подтверждений.

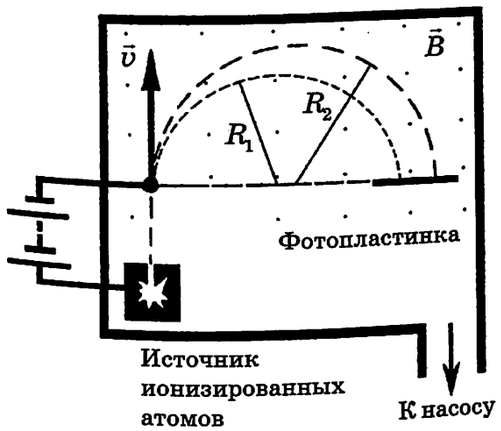
Сам факт возможности существования вещества при определенных условиях в трех разных агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом, является тому доказательством. Раз движущиеся молекулы не разлетаются в разные стороны, а образуют твердое тело или жидкость, которые сохраняют собственный объем, значит, есть силы, удерживающие молекулы вблизи друг друга.

Исследователи сравнительно давно установили, что эти силы (силы межмолекулярного взаимодействия) обнаруживают себя на расстояниях, сравнимых с размерами самих молекул или атомов, и зависят от расстояния между частицами. При этом обращает на себя внимание двойственный характер сил. Когда расстояние между частицами, первоначально находящимися на большом удалении друг от друга, уменьшается, частицы сначала слабо, а затем все сильнее притягиваются друг к другу. При дальнейшем уменьшении расстояния силы межмолекулярного взаимодействия начинают ослабевать и практически становятся равными нулю на расстоянии порядка размера (диаметра, если частицы считать маленькими шариками) частиц.

Дальнейшее уменьшение расстояния между частицами приводит к резкому увеличению сил межмолекулярного взаимодействия. При этом силы носят характер сил отталкивания, они препятствуют дальнейшему сближению частиц.

Количественная теория межмолекулярных сил еще не построена. Однако ясно, что эти силы сводятся к силам электромагнитных взаимодействий между элементарными зарядами, из которых состоят атомы. На рисунках мы показали, как можно, исходя из представлений о строении атомов (и молекул), пояснить такой характер межмолекулярных сил. Это связано, по-видимому, с тем, что электрические поля, созданные положительными и отрицательными зарядами атома, не дают в результате сложения «нулевое» поле. Это поле быстро убывает с расстоянием, но на малых расстояниях способно вызывать такое перераспределение заряда в соседнем атоме, которое приводит к появлению сил притяжения. На меньших расстояниях начинают взаимодействовать электронные оболочки атомов, что приводит к появлению значительных сил отталкивания.

§ 24. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ, РАЗМЕРОВ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ



Относительная масса атома

1. Обозначение: M_r;

2. Число, показывающее, во сколько раз масса данного атома больше 1/12 массы атома углерода-12:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0C}}$$

где m_0 — масса атома; m_{0C} — масса атома углерода-12.

3. Относительная масса атома — безразмерная величина: $[M_r] = 1$.

4. $$\frac{1}{12}m_{0C} \equiv 1 \text{ а.е.м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Расчет относительной массы молекулы

1. Формула молекулы: $CuSO_4$.

2. Относительные массы всех атомов в составе молекулы (из периодической системы):

$m_{0Cu} = 64$; $m_{0S} = 32$; $m_{0O} = 16$.

3. Относительная масса молекулы равна сумме относительных масс всех атомов, входящих в ее состав: $M_r = 160$.

4. Удобная форма записи:

$$\underbrace{CuSO_4}$$
$$M_r = 1 \cdot 64 + 1 \cdot 32 + 4 \cdot 16 = 160$$

Для построения количественной теории необходимо знание характеристик (или параметров) объектов, поведение которых предполагается рассматривать. В нашем случае основные объекты — это атомы или молекулы (или структурные частицы) различных веществ.

Поэтому опытное определение их массы, размеров и скоростей молекул может служить прямым доказательством их существования.

Измерение массы атомов и молекул — одинаково важная проблема и для физики, и для химии. Сегодня возможны прямые измерения массы при помощи масс-спектрометров. С устройством этих приборов мы уже знакомились ранее.

Однако, первые способы измерения массы структурных частиц вещества появились в химии. Эти способы основаны на сравнении масс атомов разных химических элементов между собой.

В качестве «эталона» массы в химии принята1/12 массы атома углерода-12. Этому есть две причины. Первая связана с тем, что углерод входит в огромное число самых разных (в том числе органических соединений). Вторая — с тем, что при таком выборе «эталона» массы атомов большинства химических элементов оказываются близкими к целым числам.

Поскольку при данном подходе ищут во сколько раз масса какого-то атома больше 1/12 массы атома углерода, то полученное число является, во-первых, отношением и поэтому называется **относительной массой атома**, во-вторых, эта величина — безразмерная.

Относительные массы атомов всех химических элементов точно измерены и приведены в специальных таблицах. Значения относительных масс атомов приведены также в периодической системе Менделеева, ведь это важнейшая характеристика атома. Округляя значения массы атома до целого числа, мы определяли массовое число ядра в ядерной физике.

Зная относительную массу атома, нетрудно подсчитать относительную массу любой молекулы. Для этого нужно воспользоваться свойством аддитивности массы. Это свойство массы в химических превращениях выполняется достаточно строго. Не

$$m_0(CuSO_4) = 160 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 2{,}6 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$$

$\underline{H_2O}$

$$M_r = 2 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 18;$$

$$m_0(H_2O) = 18 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Число структурных частиц (атомов или молекул):

$$N = \frac{m}{m_0},$$

где m — масса тела, а m_0 — масса структурной частицы (атома или молекулы).

$$N = \frac{1 \text{ кг}}{m_{0C}} = \frac{1 \text{ кг}}{12 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 5 \cdot 10^{25};$$

$$N = \frac{12 \text{ г}}{m_{0C}} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{12 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 6{,}02 \cdot 10^{23};$$

$$N_A \equiv N(12 \text{ г углерода-12}) = 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$$

Количество вещества

1. Обозначение: ν;

2. Формула-определение: $\nu = \dfrac{N}{N_A}$

3. Физический смысл: количество вещества показывает, во сколько раз число структурных частиц, содержащихся в теле, больше числа струкутурных частиц, содержащихся в 12 г углерода-12;

4. Единица измерения: моль.

1 моль вещества содержит число частиц $N = N_A$.

Молярная масса вещества

1. Обозначение: M;

2. Формула-определение: $M = m_0 N_A$;

3. Физический смысл: молярная масса показывает, чему равна масса вещества, взятого в количестве 1 моль.

4. Единица измерения: $[M] = кг/моль$.

Расчет молярной массы воды:

$$M(H_2O) = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \approx$$

$$\approx 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$$

случайно, закон сохранения массы, установленный еще А. Лавуазье, успешно применяется в расчетах химических реакций.

Относительную массу атома или молекулы нетрудно пересчитать в килограммы. Для этого нужно воспользоваться значением 1 а.е.м., выраженной в килограммах.

Если известна масса молекулы или атома, то по массе тела можно рассчитать число молекул или атомов в нем. В этом случае снова нужно воспользоваться аддитивностью массы и разделить массу тела на массу одной частицы.

Конечно, число частиц в макроскопическом теле огромно. Допустим, что мы взяли 1 кг углерода-12. Тогда число частиц в нем примерно составит $5 \cdot 10^{25}$.

Во многих случаях оказывается важно знать число структурных частиц (атомов), содержащихся в том или ином теле. Понятно, что оперировать такими огромными числами неудобно. Поэтому, как и в случае с измерением массы, в качестве «числа-эталона», с которым будем сравнивать искомое число частиц в теле, выбрали число частиц, содержащихся в 12 г углерода-12. Это число получило специальное название — **постоянная Авогадро (N_A).**

Если в данном теле содержится N_A структурных частиц, то говорят, что количество вещества (в этом теле) равно 1 моль (один моль).

Тогда, чтобы найти количество вещества, содержащегося в теле, нужно сравнить число его структурных частиц с числом Авогадро.

Отношение числа частиц, содержащихся в некотором теле, к числу Авогадро называется **количеством вещества (ν).**

Нетрудно догадаться, что 12 г углерода — это масса 1 моль углерода. Так как массы структурных частиц у разных веществ различны, то и масса 1 моль этих веществ различна.

Масса 1 моль вещества называется **молярной массой**. Эта величина играет очень важную роль в химии. При помощи молярной массы удобно проводить расчеты всевозможных химических реакций, так как в них участвуют «целые» числа структурных частиц.

Зная число Авогадро и массу структурной частицы данного вещества, можно рассчитать молярную массу этого вещества. Так как в настоящее время принято проводить измерения в СИ, то молярная масса измеряется единицей «килограмм в моле». (Заметим, что при химических расчетах часто пользуются единицей «грамм в моле», отличающейся от единицы СИ в тысячу раз.)

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Связь массы вещества с молярной массой:

$$m = m_0 \cdot N = m_0 \cdot \nu N_A = \nu \cdot M.$$

Связь числа структурных частиц вещества с его массой:

$$N = N_A \cdot \frac{m}{M}.$$

Постоянная Авогадро, $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$

1. Универсальная физическая постоянная;

2. Определяет число частиц, содержащихся в 1моль любого вещества;

3. Коэффициент, который позволяет осуществить связь между макромиром физических тел с микромиром структурных частиц, из которых построены макротела.

Оценим размеры молекулы воды:

$$V = 1 \text{ см}^3; \ \rho = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3};$$

$$m = \rho V = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 1 \text{ см}^3 = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}.$$

$$N = N_A \frac{m}{M};$$

$$N = 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot \frac{10^{-3} \text{ кг}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \approx 0{,}33 \cdot 10^{23}.$$

$$V_0 = \frac{V}{N} = \frac{1 \text{ см}^3}{0{,}33 \cdot 10^{23}} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3.$$

$$d \le \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{3 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}.$$

Капля жидкого масла растекается по свободной поверхности воды, образуя мономолекулярную пленку, если площадь свободной поверхности достаточно велика.

Введенные нами величины связаны между собой простыми соотношениями. Мы приводим их с небольшими пояснениями в левом столбце параграфа.

Завершая тему об измерении массы атомов и молекул, заметим, что постоянная Авогадро является универсальной физической постоянной и играет важнейшую роль в молекулярной физике. Ее можно измерить разными способами, не связанными с нахождением масс атомов или молекул. Все способы приводят к одинаковым результатам.

Постоянная Авогадро — эта та постоянная, которая позволяет совершить переход от мира микроскопических объектов — атомов и молекул, в мир макротел. Ведь тело, содержащее 1 моль любого вещества, имеет привычные для нас размеры и массы, а постоянная Авогадро указывает, что число микроскопических структурных частиц в таком теле огромно.

Определив массу структурных частиц вещества, мы можем сделать вывод о том, что размеры этих частиц также чрезвычайно малы.

Можно провести грубую оценку линейных размеров структурных частиц какого-либо вещества (например, воды) следующим образом.

Допустим, что структурная частица воды имеет форму кубика, с ребром d. Тогда объем одной частицы равен d^3, а объем N частиц составит Nd^3. Если N— это число частиц в 1 см^3 воды (а масса такого объема равна 1 г), то можно рассчитать ребро такого кубика, то есть характерный линейный размер структурной частицы воды (ее молекулы).

Другой способ оценки линейных размеров молекул основан на следующем факте. Известно, что маленькая капля масла растекается по свободной поверхности воды, образуя на ней пятно, площадь которого остается постоянной, какой бы большой ни была площадь поверхности воды.

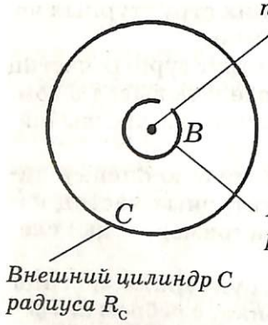
Этот факт можно объяснить тем, что капля масла растекается по поверхности воды, образуя мономолекулярную пленку (то есть пленку, толщина которой равна линейному размеру молекулы масла).

Факт: $V = 1$ мм^3 парафина в горячей воде образует пленку площадью 1 м^2.

Если d – толщина мономолекулярной пленки, то $V = dS$;

$$d = \frac{V}{S} = \frac{1 \cdot 10^{-9}\ \text{м}^3}{1\ \text{м}^2} = 10^{-9}\ \text{м} = 10^{-7}\ \text{см}.$$

Название элемента	Диаметр атома, нм	Название вещества	Диаметр молекулы, нм
Водород	0,053	Водород	0,275
Азот	0,070	Азот	0,370
Кислород	0,066	Кислород	0,364
Медь	0,128	Водяной пар	0,468
Серебро	0,144	Аммиак	0,443



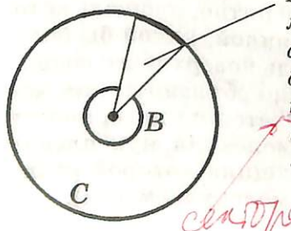
Платиновая нить, покрытая серебром

Внутренний цилиндр B радиуса R_B

Внешний цилиндр C радиуса R_C

Цилиндры B и C жестко связаны между собой, и из внутреннего пространства установки воздух откачивался до давления 10^{-5}... 10^{-6} мм рт. ст.

Максимальная температура проволоки в опытах Штерна составляла 1200 °C



В пространстве между цилиндрами атомы серебра двигались в пределах конуса, выделенного краями щели, проделанной в цилиндре B

Мы выполнили расчет толщины такой пленки, образованной молекулами парафина, когда его кусочек поместили в горячую воду.

В этом случае характерный размер структурной частицы имеет порядок 10^{-7} см, но как вам известно, эта частица состоит из большого числа атомов (около 60!).

Таким образом, линейные размеры структурных частиц вещества имеют порядок 10^{-7} ... 10^{-8} см.

В настоящее время измерение размеров атомов и молекул проводят при помощи специальных устройств — туннельных микроскопов, которые позволяют получить увеличение примерно в 100 млн. раз. Это дает размеры атомов с достаточно высокой степенью точности.

Так, например, диаметр атома углерода составляет $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ см (0,14 нм).

Измерение скорости движения молекул представляет для молекулярно-кинетической теории самостоятельный интерес.

Во-первых, повседневный опыт позволяет высказать предположение, что между температурой тела и скоростью движения частиц, из которого оно состоит, существует связь. Установление характера этой связи позволило уточнить физический смысл температуры (речь об этом впереди).

Во-вторых, знание численных значений скоростей движения молекул позволил уточнить некоторые особенности движения молекул.

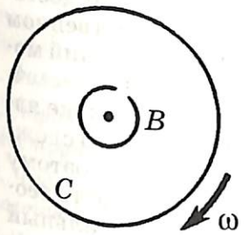
Рассмотрим опыт по прямому измерению скоростей атомов в атомных пучках, впервые проведенном в 1920 году немецким физиком О. Штерном.

Упрощенная схема его опыта, ставшего классическим, приведена на рисунке. Платиновая нить, покрытая снаружи тонким слоем серебра, располагалась вдоль оси двух коаксиальных (то есть имеющих общую ось) цилиндров. Из пространства цилиндров воздух тщательно откачивался до давления 10^{-5} ... 10^{-6} мм рт. ст.

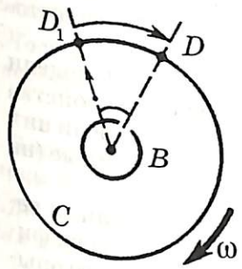
При пропускании тока по платиновой нити она разогревалась до температуры выше 962 °C (температура плавления серебра). При этом серебро интенсивно испарялось и его атомы летели во все стороны от нити к внутренней поверхности цилиндра B.

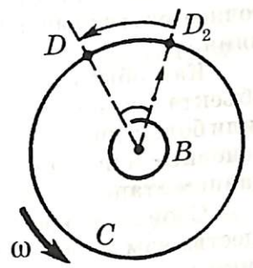
Щель, проделанная в стенке этого цилиндра, выделяла узкий пучок атомов серебра, которые, двигаясь дальше, достигали внутренней стенки цилиндра C и оседали

Такой профиль имела полоска, образованная атомами серебра на внутренней поверхности цилиндра C, когда цилиндры были неподвижны.



Цилиндры приводились во вращение с угловой частотой 2500 ... 2700 мин$^{-1}$





При вращении цилиндров центр полоски серебра, образованной на внутренней поверхности цилиндра C смещался в точку D_1 или D_2 в зависимости от направления вращения.

$$t = \frac{R_C - R_B}{\upsilon}$$

время, необходимое атому серебра, движущемуся со скоростью υ, чтобы пройти расстояние между цилиндрами.

$$l \equiv \breve{D}D_1 = \omega R_C \cdot t$$

За это время цилиндры успеют повернуться на угол $\varphi = \omega t$, опирающийся на дугу такой длины.

$$\upsilon = \frac{\omega (R_C - R_B) R_C}{l}$$

скорость атома серебра можно рассчитать, так как значения всех (кроме нее) входящих в эту формулу величин известны из опыта.

Профиль слоя серебра на внутренней поверхности цилиндра C свидетельствует о том, что атомы серебра движутся с разными скоростями при одной и той же температуре.

на ней. (Для того, чтобы атомы серебра лучше конденсировались, стенки цилиндра C специально охлаждались.)

Цилиндры вместе с нитью можно было приводить в быстрое вращение с круговой частотой около 2500 ... 2700 мин$^{-1}$.

Когда вся система была неподвижна, атомы серебра, пройдя через щель B, оседали в точке D, расположенной точно напротив щели. Они образовывали полоску с резкими, четкими краями.

Когда вся система приводилась во вращение, атомы серебра оседали в точках D_1 или D_2 в зависимости от направления вращения цилиндров. В этом случае полоска осевшего на стенку цилиндра C серебра образовывалась в другом месте.

Это смещение места конденсации атомов серебра можно объяснить так. За время, которое необходимо атому серебра для преодоления расстояния между цилиндрами B и C, система успевает повернуться на некоторый угол. Чем больше скорость вращения цилиндров (при прочих равных), тем значительнее оказывалось угловое смещение.

Несложный расчет позволяет получить связь между скоростью движения атомов серебра и параметрами экспериментальной установки. Измеряя смещение полоски серебра (при наличии вращения) на внутренней поверхности цилиндра C, можно рассчитать значение скорости атомов серебра.

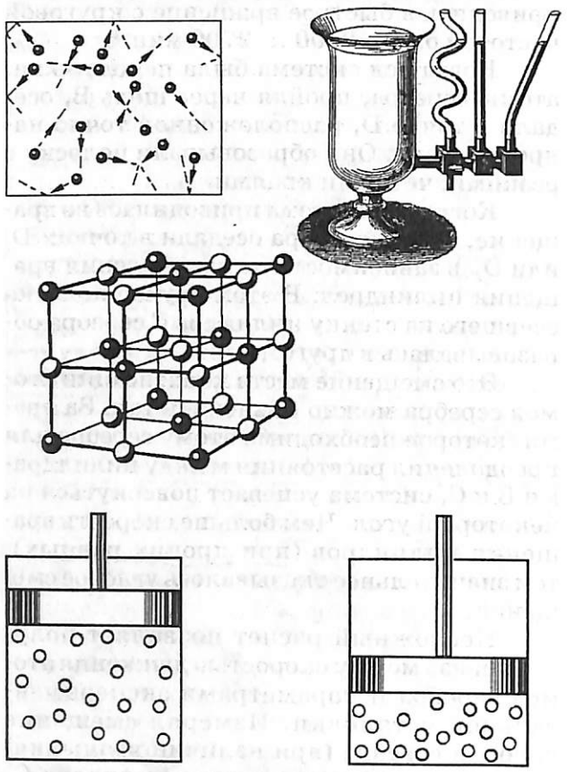
В опыте О. Штерна обнаружился очень интересный факт. Полоски серебра, образованные на поверхности цилиндра C при его вращении, в отличие от полоски, полученной в случае неподвижных цилиндров, всегда получались размытыми. Их края плавно сходили «на нет», а в середине полоски наблюдалась наибольшая толщина слоя.

Этот результат можно было интерпретировать только одним способом: атомы серебра при одной и той же температуре имеют разные скорости.

Измеряя значение смещения для обоих краев полоски и проводя соответствующие расчеты, О. Штерн получил, что при температуре, равной 1200° C, скорости большинства атомов серебра лежат в интервале от 560 м/с до 640 м/с.

Таким образом, скорости движения атомов оказались весьма большими и с заметным разбросом для атомов одного сорта при одной и той же температуре.

§ 25. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ



Большинство явлений окружающего нас макроскопического мира можно достаточно просто и наглядно на качественном уровне объяснить на основе положений молекулярно-кинетической теории.

Количественное описание этих же явлений требует применения довольно сложного математического аппарата. Поэтому лишь опишем в общих чертах ту часть теории, в которой рассматривается идеальный газ — самая простая модель вещества, а точнее, его газообразного агрегатного состояния.

Как обычно, для построения модели объекта нужно установить все его свойства (или большинство их) , выделить среди них основные и исключить второстепенные (на данном этапе рассмотрения).

Свойства газообразного состояния вещества вам хорошо известны из курса физики основной школы и повседневного опыта. Поэтому просто перечислим их.

Газ не имеет собственной формы и не обладает собственным объемом, занимая все предоставленное ему пространство. Поэтому для изучения свойств газа и процессов, происходящих с ним, газ помещают в закрытый сосуд. В этом случае объем газа равен внутреннему объему сосуда, форма сосуда, как показывают опыты, на протекание явлений влияния не оказывает.

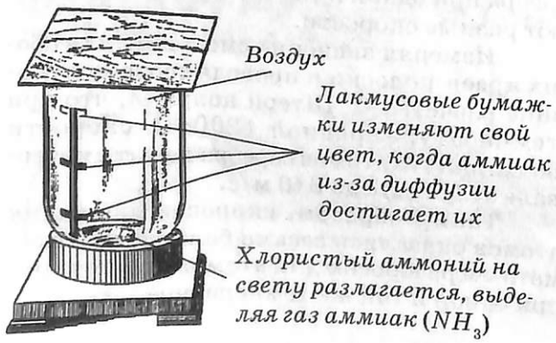
Объем газа можно легко изменять, увеличивая или уменьшая его. При этом при сжатии газа обнаруживаются силы упругости, которые возрастают по мере сжатия.

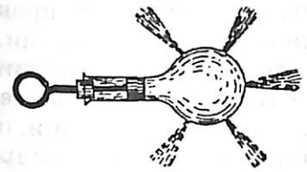
Плотность газов значительно меньше плотности жидкостей и твердых тел, состоящих из того же вещества при обычных условиях.

Явление диффузии происходит в газе сравнительно быстро и сильно зависит от его температуры.

При понижении температуры и уменьшении объема газ можно превратить в жидкость, сконденсировать. Конденсация каждого газа может происходить при разных температурах, если вблизи имеется свободная поверхность жидкости. Если свободной поверхности вблизи нет, то конденсация происходит при наличии центров конденсации и вполне определенной температуре, различной для каждого газа.

Вещество: вода, H_2O	
Название состояния	Плотность, кг/м³ при 0°С и норм. атм. давл.
Лед	900
Вода	1000
Водяной пар (насыщенный)	0,005


Воздух
Лакмусовые бумажки изменяют свой цвет, когда аммиак из-за диффузии достигает их
Хлористый аммоний на свету разлагается, выделяя газ аммиак (NH_3)



Идеальный газ

1. Физическая модель газа;

2. Структурные частицы — небольшие упругие бесструктурные шарики;

3. Частицы совершают тепловое движение: постоянное и хаотическое;

4. Частицы не взаимодействуют друг с другом силами межмолекулярного притяжения;

5. Частицы сталкиваются друг с другом. Столкновения абсолютно упругие.

Допущения:

1. В промежутках между столкновениями частицы движутся равномерно прямолинейно;

2. Движение любой частицы подчиняется законам классической механики.

Реальный газ приближается по своим свойствам к идеальному газу, если:

1. Газ одноатомный;

2. Расстояния между частицами велики по сравнению с размерами частиц (это условие выполняется, если плотность и давление газа не слишком велики).

Или средняя кинетическая энергия движения частицы газа значительно больше потенциальной энергии взаимодействия этих частиц.

Газ как макроскопическая система		Газ как совокупность большого числа частиц	
макроскопические параметры		**микроскопические параметры**	
масса	m	масса частицы	m_0
объем	V	размеры частицы	d_0
давление	p	скорость частицы	υ
температура	T	импульс частицы	$m_0\vec{\upsilon}$
плотность	ρ	кинетическая энергия частицы	$W_к$
		концентрация частиц	n

Газы передают производимое на них давление во все точки газа без изменения.

Наконец, в обычном состоянии газы электрически нейтральны и магнитные свойства проявляются весьма слабо.

Анализ этих свойств позволяет сделать следующие предположения. Первое: электрически нейтральные структурные частицы газов находятся в среднем на расстояниях, которые значительно больше размеров этих частиц, поэтому силами межмолекулярного взаимодействия между ними можно пренебречь. Второе: частицы газа совершают тепловое движение. Так как при обычных давлениях скорость диффузии в газах мала, по сравнению со скоростью движения частиц газа, то следует предположить, что между молекулами происходят столкновения, хотя размеры молекул чрезвычайно малы. Третье: процесс конденсации газа в жидкость связан с появлением сил межмолекулярного взаимодействия между частицами газа. А так как количественная теория этих сил не построена, то будем полагать, что газ, модель которого мы строим, не может ни при каких условиях превращаться в жидкость.

Таким образом, **модель идеального газа** представляет собой следующее. Идеальный газ состоит из частиц, которые: а) можно считать упругими шариками очень малых размеров, б) совершают тепловое движение, в) взаимодействуют только при столкновениях.

Как макроскопическую систему, состоящую из большого числа частиц, газ можно характеризовать следующими макроскопическими параметрами: массой, объемом, давлением и температурой.

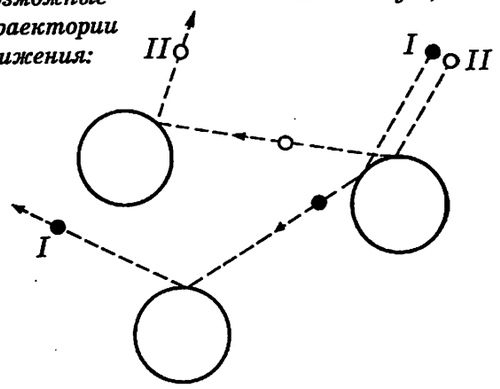
Каждую структурную частицу идеального газа можно характеризовать массой, размерами (ими мы в большинстве случаев пренебрегаем), скоростью движения, а также импульсом и кинетической энергией.

Задача молекулярно-кинетической теории идеального газа состоит в том, чтобы с помощью модели установить связь между макроскопическими характеристиками (параметрами) газа и микроскопическими характеристиками его структурных частиц. Это позволит установить (или уточнить) физический смысл макроскопических параметров и найти связь между ними.

Опыты, в которых макроскопические параметры могут быть измерены при помощи соответствующих приборов, в свою оче-

Начальные положения: ситуация I или ситуация II

Возможные траектории движения:



Малейшая неточность в задании начального положения (I или II) малой частицы делает невозможным предсказание, с какой большой частицей (даже неподвижной) столкнется малая частица после первого столкновения.
В результате последовательных столкновений неопределенность положения малой частицы усиливается. (За 1с 10^9 столкновений!)

Одному и тому же макроскопическому состоянию системы отвечает огромное число микроскопических состояний.

Обозначения:

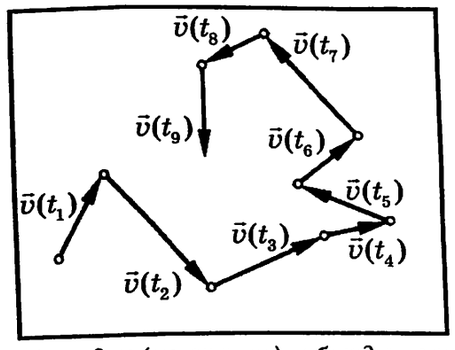
υ – скорость молекулы;

$\overline{\upsilon}$ – среднее значение скорости молекул;

$\overline{\upsilon^2}$ – средний квадрат скорости молекул;

$W_к$ – кинетическая энергия молекулы;

$\overline{W_к}$ – средняя кинетическая энергия движения молекул;



Проведем (мысленно) наблюдение за движением одной, выбранной произвольно молекулы

редь, могут подтвердить или опровергнуть предсказания построенной теории.

Однако, прежде чем установить такие связи и записать основные уравнения молекулярно-кинетической теории, попробуем найти ответ на следующий вопрос.

Как можно устанавливать какие-то связи между макроскопическими параметрами, характеризующими газ в целом, с микроскопическими характеристиками отдельных молекул газа, то есть установить некоторые закономерности, если начальные координаты молекул установить невозможно, скорости движения молекул при одной и той же температуре (как это было установлено в опытах Штерна) различны и между молекулами происходят постоянные столкновения?

Ответ на этот вопрос определяет сущность законов молекулярно-кинетической теории. Конечно, сделать прогноз в отношении движения каждой отдельной молекулы не представляется возможным. Однако, задача исследования систем, состоящих из большого числа частиц все же поддается решению.

Поведение таких систем обнаруживает определенные закономерности нового типа — статистические закономерности. Оказывается, что для описания свойств макроскопических тел и процессов, происходящих с ними, не нужно знать значения начальных координат и импульсов всех частиц, как в классической механике. Следует знать лишь средний результат, к которому приводит движение совокупности всех частиц. А вот его-то и можно предвидеть с помощью статистических законов.

Этот факт не должен вызывать у вас недоумения: ведь вы, например, не удивляетесь тому факту, что давление и температура газа в сосуде могут оставаться постоянными на протяжении значительных промежутков времени, в то время, как молекулы газа беспрерывно хаотически движутся и микроскопические состояния системы постоянно сменяют друг друга.

Поэтому важно научиться определять средние значения любых величин, зависящих от координат и скоростей молекул, без вычисления зависимости координат и скоростей от времени для каждой молекулы.

Рассмотрим для примера задачу о вычислении среднего квадрата скорости молекул газа. Опишем две возможные, но разные процедуры вычисления этой величины.

Проведем N_0 измерений скорости этой частицы через равные промежутки времени:

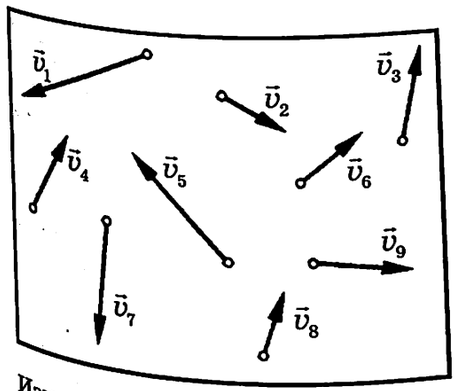
$\upsilon(t_1), \upsilon(t_2), \upsilon(t_3), \ldots, \upsilon(t_{N_0})$.

Возведем в квадрат значения скоростей:

$\upsilon^2(t_1), \upsilon^2(t_2), \upsilon^2(t_3), \ldots, \upsilon^2(t_{N_0})$.

$$\left\langle \upsilon^2 \right\rangle = \frac{\upsilon^2(t_1) + \upsilon^2(t_2) + \upsilon^2(t_3) + \ldots + \upsilon^2(t_{N_0})}{N_0},$$

где $\left\langle \upsilon^2 \right\rangle$ – среднее по времени значение квадрата скорости движения одной произвольно выбранной молекулы.



Измерим одновременно скорости движения всех молекул газа:

$\upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3, \ldots, \upsilon_N$.

Возведем в квадрат значения скоростей:

$\upsilon_1^2, \upsilon_2^2, \upsilon_3^2, \ldots, \upsilon_N^2$.

$$\overline{\upsilon^2} = \frac{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 + \upsilon_3^2 + \ldots + \upsilon_N^2}{N},$$

где $\overline{\upsilon^2}$ – среднее значение квадрата скорости движения всех молекул газа в данный момент времени.

Основное допущение:

$$\overline{\upsilon^2} = \left\langle \upsilon^2 \right\rangle$$

Найдем проекции скоростей всех молекул на ось OX в один и тот же момент времени

$\upsilon_{1x}, \upsilon_{2x}, \upsilon_{3x}, \ldots, \upsilon_{Nx}$.

Возведем в квадрат значения проекций скоростей:

$\upsilon_{1x}^2, \upsilon_{2x}^2, \upsilon_{3x}^2, \ldots, \upsilon_{Nx}^2$.

Первая процедура такова. Допустим, что мы выбрали из всей совокупности молекул газа какую-то одну и будем «следить» за ее движением. При этом через малые равные промежутки времени будем измерять значения ее скорости.

Проведя очень большое число N_0 таких измерений, найдем значения квадратов полученных скоростей и затем подсчитаем среднее арифметическое этих значений. В этом случае мы нашли среднее по времени значение квадрата скорости для данной случайной молекулы. Данную процедуру можно реализовать экспериментально.

Вторая процедура — чисто математическая. Будем исходить из того, что все молекулы газа в данный момент времени находятся в одинаковых условиях и ни одна из них не выделяется среди других в смысле характера движения или своего поведения. Измерим в один и тот же момент времени скорости движения всех N молекул газа. Теперь вычислим значения квадратов найденных скоростей и найдем среднее арифметическое квадратов скоростей всех молекул в данный момент времени. В этом случае мы нашли среднее значение квадрата скорости в данный момент времени по всей совокупности молекул газа.

Так как число молекул в газе огромно и все они движутся хаотически, то можно принять следующее **основное допущение статистической механики:** среднее по времени значение квадрата скорости движения молекулы равно среднему значению квадрата скорости по всей совокупности.

Таким образом, молекулярно-кинетическая теория может оперировать статистическими средними значениями величин вместо средних по времени значений для каждой частицы, которые непосредственно вычислить заведомо невозможно.

Во многих случаях при решении задач статистической механики требуется знание среднего квадрата проекции скорости движения молекул на выбранное направление оси OX. Значение этой величины определяется аналогично среднему значению квадрата скорости молекул по совокупности.

При этом хаотический характер движения огромного числа молекул позволяет сделать следующее весьма разумное предположение: значения среднего квадрата проекции скорости на любые выбранные оси равны между собой (ведь в газе нет выделенного преимущественного направ-

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + v_{3x}^2 + \ldots + v_{Nx}^2}{N},$$

где $\overline{v_x^2}$ – среднее значение квадрата проекции скорости движения молекул газа в данный момент времени.

По теореме Пифагора:

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2;$$

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2};$$

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2},$$

так как движение хаотично.

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}.$$

Кислород, t°C = 0°C	
Интервалы скоростей, м/с	Доля молекул, %
От 0 до 100	1,4
От 100 до 200	8,1
От 200 до 300	16,7
От 300 до 400	21,5
От 400 до 500	20,3
От 500 до 600	15,1
От 600 до 700	9,2
Более 700	7,7

***Состояние теплового равновесия** — это состояние, в котором при отсутствии внешних воздействий значения всех макроскопических параметров, характеризующих систему, остаются постоянными сколь угодно долго.*

Основная гипотеза статистической механики

1. Число частиц в системе неизменно, $N = \text{const}$;

2. Полная энергия системы: $\sum_{i=1}^{N} W_{к,i} = \text{const}$;

3. Любая конфигурация частиц в системе равновероятна.

Основная идея статистики: если система находится в состоянии теплового равновесия, то скорости молекул описываются наиболее вероятным распределением.

ления движения молекул).

Но тогда, пользуясь теоремой Пифагора, можно представить средний квадрат скорости как сумму средних квадратов проекций скоростей на три взаимно перпендикулярные оси. Учитывая, что слагаемые в этой сумме имеют одинаковые значения, получим замечательное соотношение: средний квадрат проекции скорости движения молекул на любое направление равен одной трети среднего квадрата их скорости.

Этот коэффициент — одна треть — появляется вследствие трехмерности нашего пространства и того факта, что вектор однозначно определяется заданием трех чисел: его проекций на любые три взаимно перпендикулярные оси.

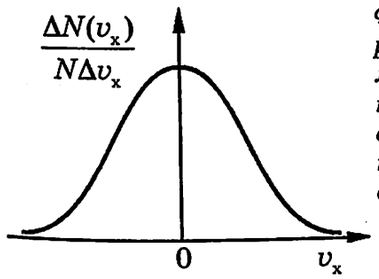
Во многих случаях знания только средних значений физических величин при рассмотрении задач молекулярной физики недостаточно. Например, при измерении скорости молекул в опыте Штерна мы уже сталкивались с подобной проблемой, когда обнаружили, что при вращении цилиндров полоска серебра не просто смещается относительно положения, получаемого при отсутствии вращения, но и значительно расширяется, сходя «на нет» на обоих краях. При этом толщина слоя серебра оказалась неодинаковой в разных частях полоски.

Это говорит о том, что число молекул, имеющих значение скорости, лежащее в одном и том же определенном интервале, зависит от значения скорости. Так, число молекул, имеющих значительное отклонение в значении скорости от среднего как в сторону увеличения, так и в сторону ее уменьшения, мало по сравнению с числом молекул, скорости которых близки по значению к среднему значению.

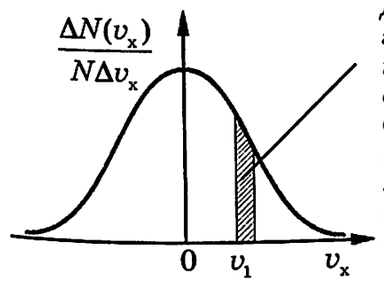
Первым, кто нашел, как можно найти число молекул, имеющих скорости, отличные от среднего значения, был Дж. К. Максвелл. Он предположил, что скорость каждой отдельной молекулы можно рассматривать как случайную величину и что в газах в состоянии теплового равновесия существует некоторое **распределение скоростей**, не изменяющееся со временем.

Это означает, что число молекул, имеющих скорости в заданном интервале значений, остается постоянным в состоянии теплового равновесия. Исходя из этих предположений, Максвелл теоретическим путем нашел это распределение.

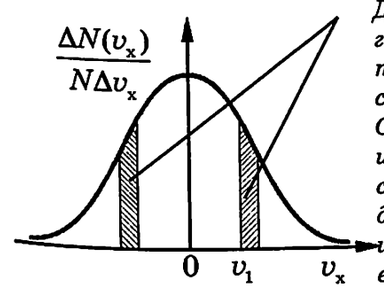
В задачу нашего курса не входит подробное обсуждение того, как было получено это распределение, мы рассмотрим только его основные следствия.



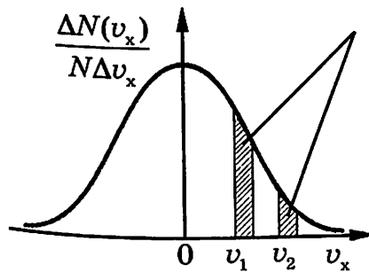
Функция распределения молекул по проекциям скоростей на произвольную ось OX



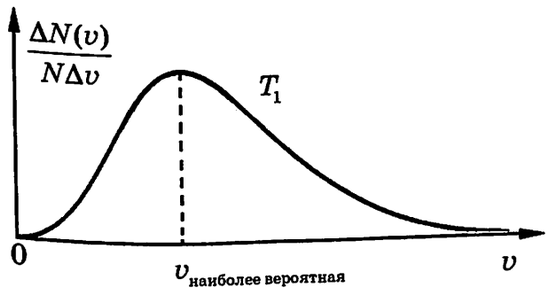
Доля молекул газа, у которых проекции скорости на ось OX положительны и лежат в интервале скоростей от v_1 до $(v_1+\Delta v)$



Доли молекул газа, у которых проекции скорости на ось OX лежат в интервале скоростей от v_1 до $(v_1+\Delta v)$ и имеют противоположные знаки, одинаковы.



Доли молекул газа, у которых проекции скорости на ось OX лежат в интервале от v_1 до $(v_1+\Delta v)$ и от v_2 до $v_2+\Delta v$), разные



Максвелл рассчитал для каждого возможного значения скорости наиболее вероятное число частиц газа, имеющих значения скоростей, лежащих в заданном (единичном) интервале скоростей, и определил их долю в общем числе молекул газа. Как оказалось, для данного газа это число зависит только от значения скорости и температуры газа. Совокупность таких чисел для всех возможных скоростей молекул данного газа при данной температуре образует так называемую **функцию распределения** молекул газа по скоростям.

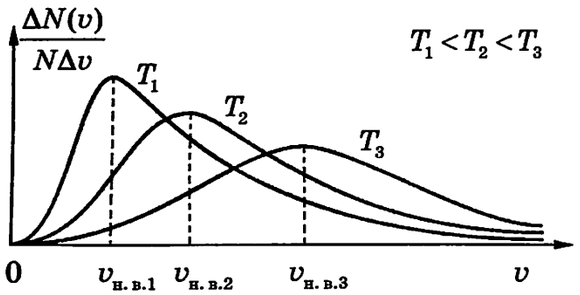
На рисунке представлена функция распределения проекции скорости движения молекул газа от значений проекции скорости движения молекул на произвольно выбранную ось (например, *OX*). Эта функция распределения имеет характерную колоколообразную форму, которая часто встречается в статистической теории и называется кривой Гаусса.

Симметричная форма этой кривой говорит о том, что количества молекул, которые имеют одинаковые по значению, но противоположные по знаку проекции скоростей, одинаковы.

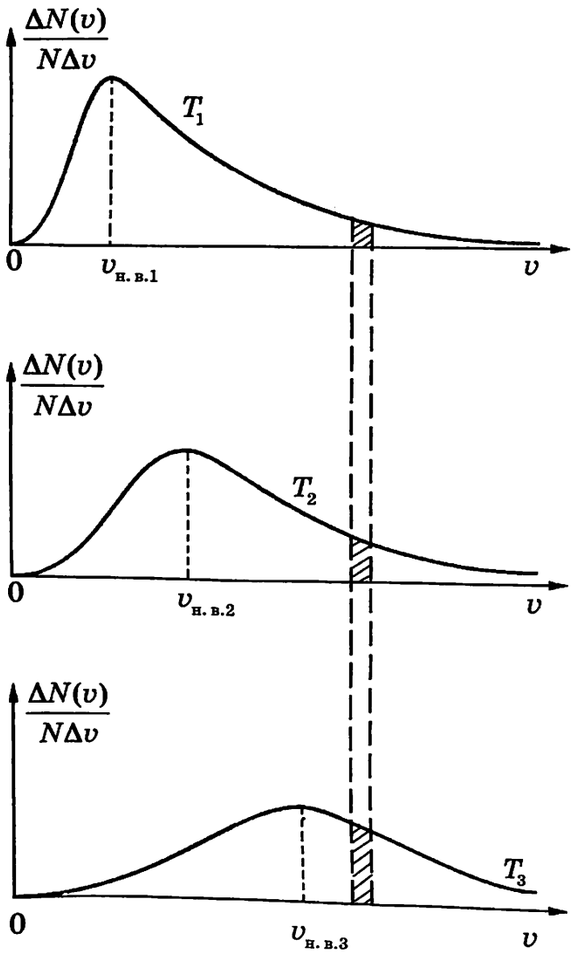
Из этого распределения также следует, что число молекул, у которых значения проекций скорости на заданное направление очень велики, невелико по сравнению с числом молекул, проекции скоростей которых на это же направление близки к нулю (ведь в целом газ не перемещается ни в одном направлении).

На нижнем рисунке представлена функция распределения молекул газа по значению скоростей. (Напомним, что значение скорости — всегда положительное число, поэтому весь график функции лежит справа от нуля.) Форма этой кривой — несимметрична. Это связано с тем, что при каждой температуре имеется своя наиболее вероятная скорость движения молекул и большинство молекул имеют скорости, близкие к ней.

По мере увеличения температуры максимум этой кривой смещается в область больших скоростей, а форма кривой становится более сглаженной, так как площадь под ней имеет простой физический смысл: она численно равна числу частиц газа, для которого это распределение построено.



При повышении температуры газа максимум кривой распределения смещается в сторону увеличения скоростей.



При повышении температуры доля молекул, имеющих скорости, лежащие в интервале от v_1 до $(v_1 + \Delta v)$, увеличивается, пока их скорости больше, чем $v_{\text{н.в.k}}$.

Теория Максвелла позволила вычислить значения наиболее вероятной и средней квадратичной скоростей в зависимости от температуры газа и сравнить их с соответствующими значениями, полученными экспериментально. Кроме того, распределение молекул по скоростям Максвелла оказалось справедливым не только для газов, но и для жидкостей и твердых тел. И только в тех случаях, когда для описания движения частиц нельзя применять классическую механику, распределение Максвелла перестает быть верным.

Из приведенных графиков видно, что при любой температуре имеется некоторая доля молекул, которые имеют скорости, существенно превосходящие среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорость движения при этой температуре.

При повышении температуры газа увеличивается доля таких «быстрых» молекул. Этот факт оказывается очень значимым при протекании многих явлений. Например, испарение жидкости происходит за счет именно таких «быстрых» молекул, ведь они обладают энергией, достаточной для преодоления притяжения со стороны молекул жидкости.

Так как такие «быстрые» молекулы имеются при любой температуре, то и испарение жидкости происходит при любой температуре. А интенсивность испарения быстро возрастает с повышением температуры, что полностью соответствует наблюдаемому в эксперименте.

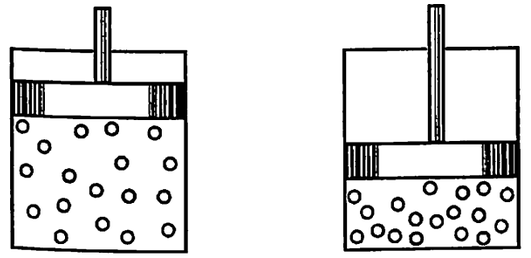
Теоретические предсказания Максвелла неоднократно проверялись опытным путем, и во всех случаях наблюдалось совпадение опытных данных с теоретическими предсказаниями.

Снова обратимся к опыту Штерна. Заметим, что, измеряя толщину полоски серебра в разных местах, можно приблизительно подсчитать число атомов серебра, скорости которых лежат в некотором интервале. По этим данным можно построить распределение молекул серебра по скоростям и сравнить его с максвелловским для данной температуры.

Проведение такого сравнения дало прекрасное совпадение опытных данных с предсказанием теории.

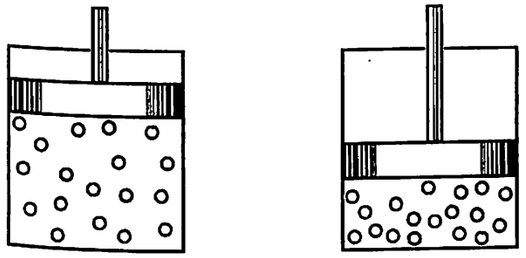
Таким образом, опыт Штерна можно считать экспериментальным подтверждением статистической теории идеального газа Максвелла.

§ 26. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



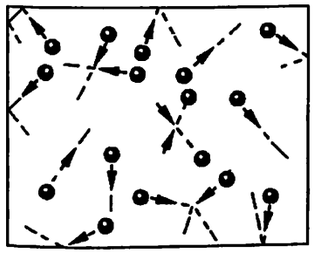
Масса газа в этих цилиндрах одинакова, так как одинаково число структурных частиц (молекул) газа в них:

$$m = m_0 N.$$



Объем газа в этих цилиндрах различен, хотя «собственный» объем молекул газа один и тот же. В модели идеального газа выполняется такое соотношение:

$$V_{\text{собств.}} << V_{\text{газа}}.$$



Молекулы газа, вследствие теплового движения, испытывают соударения со стенками сосуда. Совокупное действие молекул на стенки сосуда проявляется в возникновении давления в макромире.

$$p = \frac{F_\perp}{S},$$

p – *давление газа,*

$F_\perp$ – *сила нормального давления,*

S – *площадь поверхности.*

$$[p] = \text{Па}.$$

Мы уже говорили о том, что основная задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы дать объяснение макроскопическим параметрам, при помощи которых мы описываем состояние идеального газа. К числу таких параметров мы относили массу газа, его объем, давление и температуру. Другие параметры, например, плотность газа или концентрация частиц, являются производными от перечисленных выше и их физический смысл определяется обычным способом.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории масса газа является суммой масс всех структурных частиц, составляющих данную макроскопическую систему.

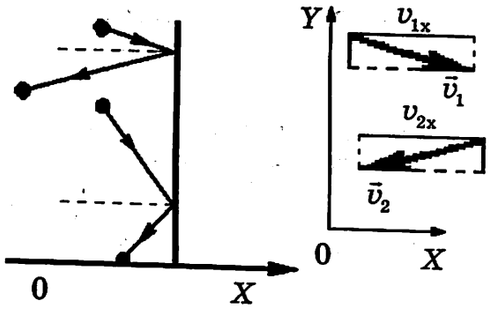
Объем, занимаемый газом, определяется объемом сосуда, в котором находится рассматриваемый газ и не зависит от суммарного объема всех частиц газа. Так как обычно расстояния между частицами газа оказываются значительно больше размеров самих частиц, то во многих случаях можно считать молекулы идеального газа материальными точками.

Однако, при рассмотрении характера теплового движения частиц идеального газа пренебрегать размерами молекул нельзя, ведь молекулы за 1 с испытывают огромное число столкновений друг с другом. Вот почему в модели идеального газа мы считаем молекулы очень маленькими упругими шариками.

Для того, чтобы получить уравнение, связывающее давление идеального газа с микроскопическими характеристиками его молекул, сконструируем механизм давления.

В механике мы определяли давление как физическую величину, численно равную отношению силы, действующей на тело перпендикулярно к его поверхности, к площади этой поверхности. Таким образом, давление возникает при взаимодействии двух тел. В нашем случае такими телами является газ и поверхность стенок сосуда, в котором он находится. (Мы чаще всего будем пренебрегать силой тяжести, действующей на газ, так как в привычных условиях плотность газа и размеры сосудов малы.)

Но газ состоит из отдельных молекул, следовательно, взаимодействие газа с по-



$\vec{v}_1$ — *скорость молекулы до столкновения;*

v_{1x}, v_{1y}, v_{1z} — *проекции скорости на оси OX, OY, OZ до столкновения.*

$\vec{v}_2$ — *скорость молекулы после столкновения;*

v_{2x}, v_{2y}, v_{2z} — *проекции скорости на оси OX, OY, OZ после столкновения.*

Так как столкновение абсолютно упругое, то модуль скорости не меняется и:

$v_{2x} = -v_{1x}$, *проекция на ось OX меняет свой знак;*

$v_{2y} = v_{1y}$, $v_{2z} = v_{1z}$ — *проекции на оси OY и OZ не меняются.*

Столкновения происходят чаще, если:
— концентрация молекул газа увеличивается;
— проекция скорости на направление «к стенке» возрастает:

$$p \sim n;$$
$$p \sim v_x.$$

«Сила удара» больше, если изменение проекции импульса молекулы в направлении, перпендикулярном стенке, увеличивается:

$$f_x \cdot \delta t = m_0 v_{2x} - m_0 v_{1x},$$

где f_x — сила, действующая на молекулу со стороны стенки;

δt — время взаимодействия молекулы со стенкой;

$m_0 v_{1x}$, $m_0 v_{2x}$ — проекции импульса молекулы до и после столкновения со стенкой на направление «к стенке» (ось OX).

$$m_0 v_{2x} - m_0 v_{1x} = -2 m_0 v_{1x},$$
$$p \sim 2 m_0 v_{1x}.$$

Таким образом, качественное рассмотрение дает такой результат:

$$p \sim n m_0 v_x^2.$$

верхностью стенок представляет собой огромное число столкновений отдельных молекул со стенками сосуда.

В результате столкновений молекулы изменяют направление своего движения, упруго отскакивая от стенки. Сначала мы будем считать, что такие столкновения — абсолютно упругие, то есть кинетическая энергия молекулы при отскоке от стенки не меняется. Это наблюдается (как мы покажем позже), когда температура стенок сосуда и температура газа одинаковы, то есть газ и сосуд находятся в состоянии теплового равновесия. В таком случае соударения молекул со стенками сосуда не приводят к изменению распределения молекул по скоростям.

В момент соударения молекула действует на стенку с некоторой силой, испытывая на себе (по третьему закону Ньютона) действие силы со стороны стенки. Это приводит к изменению импульса молекулы. А совокупное действие огромного числа молекул на стенку и создает давление на нее.

Описанный нами механизм давления позволяет качественно предсказать, от каких параметров зависит давление газа. Оно тем больше, чем чаще происходят столкновения молекул со стенками сосуда и чем «сильнее» действует молекула на стенку при соударении.

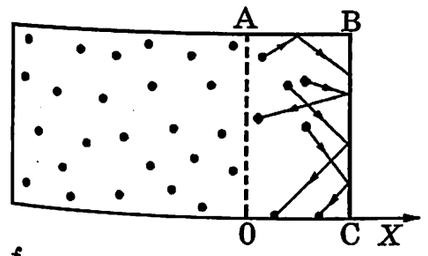
Ключевое слово «чаще» позволяет высказать предположение, что давление зависит от концентрации молекул и значения проекции скорости, с которой молекула «приближается» к стенке.

Ключевое слово «сильнее» обращает нас к изменению импульса молекулы при соударении со стенкой, так как именно оно определяется значением импульса силы, действующего на молекулу.

Теперь нетрудно вывести основное уравнение МКТ.

Поскольку мы собираемся провести расчет величины, обусловленной совокупным действием огромного числа молекул на стенку, а соударение молекулы со стенкой очень кратковременно, то выберем большой (по сравнению со временем соударения одной молекулы) промежуток времени Δt: в течение этого промежутка времени со стенкой успеет провзаимодействовать значительное число молекул.

Это число молекул нетрудно подсчитать. Выберем участок стенки площадью S и направим ось OX перпендикулярно стенке. Понятно, что за время Δt соударение со стенкой испытают все молекулы, которые имеют ненулевые и положительные проекции скорости на эту ось, и которые «успеют» за это время достичь стенки.



$f_{ix,\,ст.}$ — сила, действующая на молекулу со стороны стенки;

$f_{ix,\,м.}$ — сила, действующая на стенку со стороны молекулы;

$$|AB| = v_{ix}\Delta t;$$
$$f_{ix,\,ст.} \cdot \delta t = -2 m_0 v_{ix};$$
$$f_{ix,\,ст.} = -f_{ix,\,м.}$$

Число молекул в объеме OABC, имеющих проекции скорости близкие к v_{ix} и движущиеся к стенке, то есть имеющие $v_{ix} > 0$:

$$N_i = \frac{1}{2} n_i v_{ix} S \Delta t.$$

Переданный этими молекулами стенке импульс:

$$N_i \cdot 2 m_0 v_{ix} = \frac{1}{2} n_i v_{ix} S \Delta t \cdot 2 m_0 v_{ix} = n_i m_0 v_{ix}^2 S \Delta t.$$

Тогда все молекулы движущиеся к стенке в течение Δt передадут ей импульс, равный:

$$\sum_i n_i m_0 v_{ix}^2 S \Delta t = m_0 S \Delta t \sum_i n_i v_{ix}^2 = m_0 S \Delta t \cdot n \overline{v_x^2}.$$

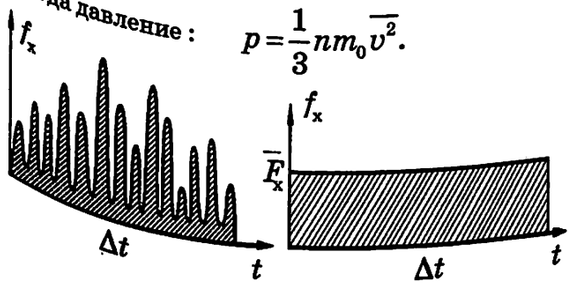
По второму закону Ньютона найдем импульс силы, действующий на стенку в течение Δt:

$$\overline{F_x} \Delta t = m_0 S \Delta t \cdot n \overline{v_x^2}.$$

Так как число молекул в выделенном объеме очень велико, то $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$, и значит, средняя сила давления на стенку составит:

$$\overline{F_x} = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} S;$$

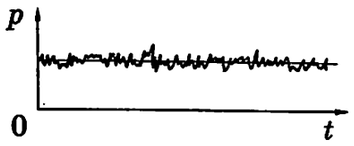
Тогда давление: $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$.



Умножая изменение импульса одной молекулы, взятое с противоположным знаком, на число молекул, испытавших соударение со стенкой в течение времени Δt, найдем изменение импульса стенки за это время.

Но изменение импульса тела (в нашем случае, стенки) связано со значением силы, действующей на него в течение этого промежутка времени по второму закону Ньютона. Следовательно, можно найти средний импульс силы, действующей на стенку, а по нему рассчитать и среднее давление газа на стенку, учитывая связь среднего квадрата проекции скорости на любую ось со средним квадратом скорости движения молекул.

Таким образом, давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул газа, массы молекулы и среднего квадрата скорости их движения. Это утверждение — вербальная формулировка основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа. Оно устанавливает связь между макроскопи-



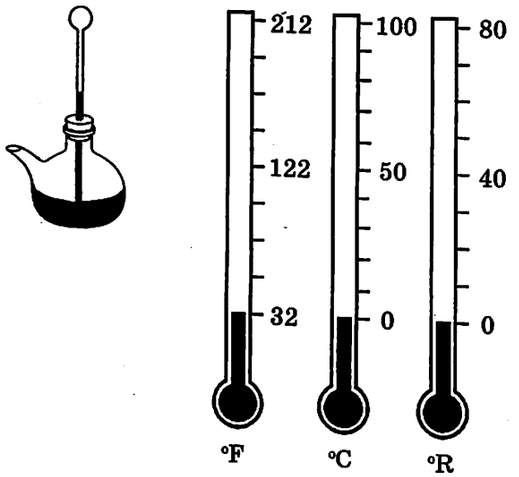
$$\overline{W_к} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2};$$

$$p = \frac{2}{3} n \overline{W_к}.$$

ческим параметром газа — его давлением, которое может быть измерено при помощи манометра, и микроскопическими характеристиками молекул газа и их движения.

Учитывая, что произведение массы молекулы на средний квадрат скорости движения является удвоенной средней кинетической энергией теплового движения молекул газа, можно представить основное уравнение МКТ в другом виде: давление идеального газа прямо пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии их движения.

§ 27. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ



После того, как мы установили связь между микроскопическими характеристиками молекул, из которых состоит исследуемый газ, и давлением, которое оказывает газ на стенки сосуда, остается невыясненным только физический смысл температуры — важнейшего макроскопического параметра любой системы.

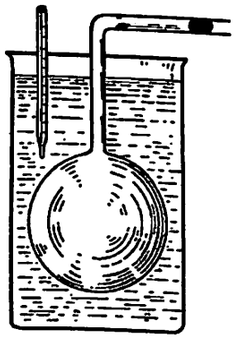
Из курса физики основной школы вам известно, что в повседневной жизни температура характеризует **степень нагретости** тел. Это субъективное представление связано с наличием в коже человека чувствительных нервных окончаний, реагирующих на тепловое раздражение.

Но это качественное и субъективное определение температуры не содержит указаний на то, как можно измерить температуру. Появление приборов и методов измерения температуры исторически стало возможным после того, как была установлена зависимость от температуры таких величин, как объем тела, его длина и т. п., которые можно измерить непосредственно.

С тех пор — термометр — прибор для измерения температуры стал неизменным атрибутом в любых исследованиях тепловых процессов.

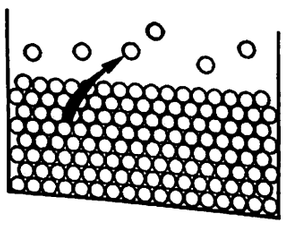
Процедура измерения температуры тела позволила ввести в рассмотрение очень важное понятие — понятие **теплового равновесия**. С ним вы тоже знакомы из курса физики основной школы.

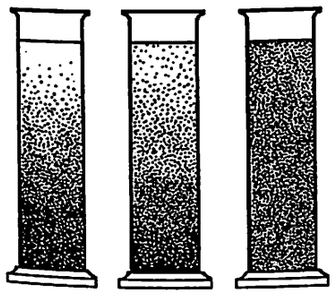
Опыт показывает, что **любые тела, составляющие замкнутую систему и имеющие разные температуры, спустя некоторое время самопроизвольно приходят в состояние теплового равновесия**. В этом состоянии значения всех макроскопических



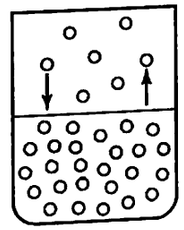
Когда жидкость, сосуд, газ в сосуде, термометр, столбик ртути в трубке приходят в состояние теплового равновесия с окружающей средой, положение столбика ртути в трубке и показания термометра перестают изменяться.

Жидкость в открытом сосуде обычно приходит в состояние теплового равновесия с окружающей средой только тогда, когда вся она испарится.





Разнородные жидкости находятся в состоянии теплового равновесия, однако процесс диффузии в них происходит, не прекращаясь



Жидкость и ее насыщенный пар находятся в состоянии теплового равновесия. Масса пара и масса жидкости не меняются, однако процессы испарения и конденсации продолжают происходить

Состояние теплового равновесия:

1. Устанавливается самопроизвольно спустя некоторое время после приведения тел в тепловой контакт;

2. Все макроскопические параметры, характеризующие тела данной системы, перестают изменяться и остаются постоянными, сколь угодно долго;

3. Температура всех тел системы становится одинаковой;

4. Макроскопические процессы между телами (теплообмен, тепловое расширение, агрегатные превращения и т. п.) прекращаются;

5. Микроскопические процессы (тепловое движение частиц, броуновское движение и т. п.) не прекращаются.

Температура:

1. Характеризует степень нагретости тел (субъективное определение температуры);

2. Является главной характеристикой состояния теплового равновесия, так как принимает одно и то же значение для всех тел системы, находящихся в таком состоянии;

3. Указывает направление естественного, самопроизвольного теплообмена между телами, приведенными в тепловой контакт: энергия передается от более нагретого тела к менее нагретому;

4. Измеряется при помощи термометра.

(или термодинамических) параметров, характеризующих данную систему, сколь угодно долго остаются постоянными.

В состоянии теплового равновесия не меняется объем тел, давление газов, заполняющих разные емкости, перестают происходить взаимные превращения твердых тел, жидкостей и газов, прекращается теплообмен, перестает изменяться длина столбика ртути в термометре и т.п.

При этом микроскопические процессы внутри тел (например, тепловое движение молекул, броуновское движение частиц, диффузия) не прекращаются и при тепловом равновесии.

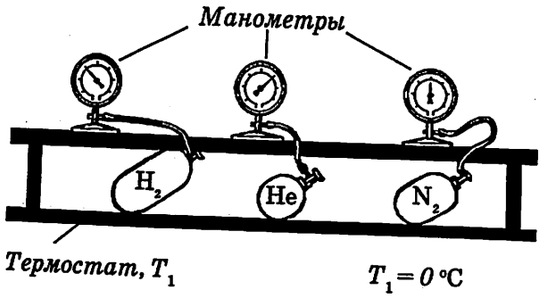
Особенностью состояния теплового равновесия является то, что единственный из термодинамических параметров, а именно, температура, не только не меняется в этом состоянии, но и оказывается одинаковой для всех тел системы. Таким образом, именно температура характеризует состояние теплового равновесия макроскопической системы тел: **во всех частях системы, находящихся в состоянии теплового равновесия, температура имеет одно и то же значение.**

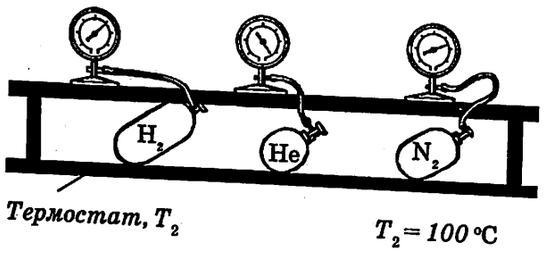
Если привести в тепловой контакт тела, имеющие разные температуры, то обнаруживается еще одно ее важное свойство. Температура определяет направление естественного теплообмена между телами: обмен энергией между телами происходит так, что тело с большей температурой отдает энергию телу с меньшей температурой.

Чему соответствует с микроскопической точки зрения равенство температур макроскопических тел при тепловом равновесии между ними?

Рассмотрим две одинаковые молекулы, движущиеся с разными скоростями и, следовательно, обладающие разными кинетическими энергиями. При столкновении таких молекул происходит следующее: скорость быстрой молекулы уменьшается, а скорость медленной — увеличивается.

Следовательно, значения кинетических энергий у молекул этих тел начинают сближаться. Спустя некоторое время многочисленные столкновения между молекулами приводят к тому, что в состоянии теплового равновесия при каждом значении температуры устанавливается некоторое вполне определенное значение средней кинетической энергии движения частиц у всех тел, входящих в данную систему.





Параметр	Водород	Гелий	Азот
N	10^{23}	10^{25}	10^{24}
T, °C	0	0	0
p, кПа	3,7	750	47
V, м³	0,1	0,05	0,08
$\frac{pV}{N}$, Н·м	$3{,}7\cdot10^{-21}$	$3{,}7\cdot10^{-21}$	$3{,}7\cdot10^{-21}$
T, °C	100	100	100
p, кПа	5,1	1030	64
V, м³	0,1	0,05	0,08
$\frac{pV}{N}$, Н·м	$5{,}1\cdot10^{-21}$	$5{,}1\cdot10^{-21}$	$5{,}1\cdot10^{-21}$

Для всех газов, находящихся в состоянии теплового равновесия, одинаковое значение имеет следующая величина:

$$\frac{pV}{N} = \Theta$$

Так как в состоянии теплового равновесия все тела имеют одинаковую температуру, то можно было бы назвать Θ температурой и измерять ее в джоулях (Нм).

Θ не зависит от выбора вещества и выбора реперных точек для градуировки шкалы, следовательно, позволяет установить физическую шкалу температуры.

Однако, это предположение требует экспериментальной проверки. Для ее проведения возьмем несколько сосудов разного объема и заполним их разными газами, например, водородом, гелием и азотом. Зная массу газа в каждом сосуде и его молярную массу, подсчитаем число структурных частиц в каждом из них.

Снабдим сосуды манометрами для измерения давления и поместим их в термостат (устройство, в котором можно поддерживать температуру постоянной).

Состояние газа в каждом сосуде сразу начнет изменяться. Это можно заметить, например, по показаниям манометров. Через некоторое время все тела этой системы придут в состояние теплового равновесия: давление газа в каждом сосуде перестает изменяться, хотя его значения в каждом сосуде различны. Измерим значения всех термодинамических параметров газа в каждом сосуде при этом значении температуры.

Повторим опыт несколько раз, изменяя значение температуры в термостате, например, увеличивая ее при переходе от одного опыта к другому. В каждом опыте будем ожидать наступления теплового равновесия, а затем измерять и записывать значения всех термодинамических параметров.

Результаты измерений, проведенных в серии опытов, показывают, что все термодинамические параметры — объем газа и его давление (в каждом сосуде) возрастают при увеличении температуры. Их значения у каждого газа различны.

Но физическая величина, численно равная произведению давления газа и его объема, отнесенному к числу структурных частиц газа в любом сосуде в каждом опыте принимает свое значение, увеличивающееся с ростом температуры. При этом в каждом опыте эта величина оказывается одинаковой для всех газов.

Так как одинаковой для всех тел системы в состоянии теплового равновесия является температура, то эта комбинация макроскопических параметров (физическая величина) может выступать в качестве определения температуры.

Смысл этой комбинации величин, а следовательно, и абсолютной (то есть не привязанной к какому-либо веществу и каким-то определенным реперным точкам) температуры, нетрудно выяснить, если воспользоваться основным уравнением МКТ. Действительно, пользуясь определением

Основное уравнение МКТ $p = \frac{2}{3} n \overline{W_к}$;

По определению концентрации $n = \frac{N}{V}$;

$$p = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\overline{W_к};$$

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3}\overline{W_к} = \Theta.$$

Если ввести $\Theta = kT$, *то*

$$\frac{2}{3}\overline{W_к} = kT,$$

$$\overline{W_к} = \frac{3}{2}kT.$$

Абсолютная температура

1. Обозначение: T;
2. Не зависит от выбора вещества и реперных точек для градуировки шкалы температур;
3. Является мерой средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества;
4. Неотрицательна;
5. Абсолютный нуль — температура, при которой средняя кинетическая энергия структурных частиц вещества обращается в нуль;
6. $[T]$ = К (кельвин).

$$\Theta_0 = kT_1; \qquad \Theta_{100} = kT_2;$$

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1);$$

$$k = \frac{\Theta_{100} - \Theta_0}{T_2 - T_1};$$

$$k = \frac{(5{,}1 - 3{,}7)\cdot10^{-21}\ \text{Дж}}{100\ \text{К}} \approx 1{,}4\cdot10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Постоянная Больцмана

1. Обозначение: k;
2. Универсальная физическая постоянная;
3. $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
4. Позволяет осуществить переход от макроскопического параметра, каким является абсолютная температура, к однородной микроскопической величине — средней кинетической энергии движения молекул.

концентрации молекул газа и проводя несложные преобразования основного уравнения, получим: произведение давления и объема идеального газа, отнесенное к числу его структурных частиц, прямо пропорционально средней кинетической энергии частиц газа.

Таким образом, средняя кинетическая энергия теплового движения молекул может быть положена в основу определения температуры. При таком определении становится понятным, что абсолютная температура, как и средняя кинетическая энергия теплового движения частиц, не может быть отрицательной. Она всегда положительна, а минимальное значении ее равно нулю. Это — первое следствие принятого нами определения абсолютной температуры.

Второе касается выбора единиц измерения температуры. Очевидно, что проще всего было бы измерять температуру в тех же единицах, что и энергию, то есть в джоулях. Однако, исторически сложилось так, что единицу измерения температуры называли градусом (независимо от выбора реперных точек и шкалы, например, по Цельсию, Фаренгейту или Реомюру).

Кроме того, оказалось, что значение средней кинетической энергии частиц даже при довольно высоких для человека температурах очень мало.

Оно имеет порядок 10^{-21} Дж. Поэтому естественно было ввести коэффициент пропорциональности между средней кинетической энергией теплового движения частиц и абсолютной температурой. Этот коэффициент, как и число Авогадро, позволяет перейти от величины, характеризующей молекулу (средняя кинетическая энергия), к однородной макроскопической величине (температуре), характеризующей макроскопическую систему.

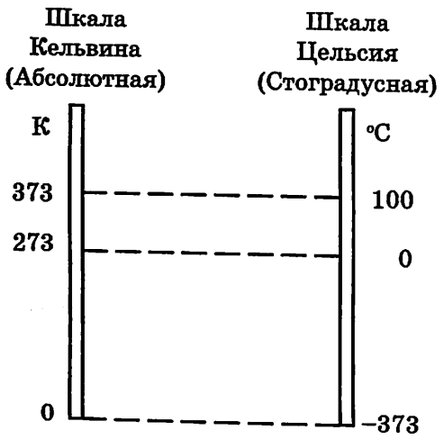
Значение этой универсальной физической постоянной, названной именем австрийского физика Л. Больцмана, одного из основоположников молекулярно-кинетической теории, можно рассчитать на основании приведенных выше опытных данных.

Если принять в качестве единицы масштаба «градус» стоградусной шкалы, и назвать единицу абсолютной температуры «кельвин», то значение постоянной Больцмана будет равно $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

При таком определении единицы абсолютной температуры нетрудно найти связь

$$\Theta_0 = kT_1 = 3{,}7\cdot10^{-21}\ \text{Дж};$$

$$T_1 = \frac{\Theta_0}{k} = \frac{3{,}7\cdot10^{-21}\ \text{Дж}\cdot\text{К}}{1{,}38\cdot10^{-23}\ \text{Дж}} \approx 273\ \text{К}.$$



$$T = t^\circ + 273$$

$$t^\circ = T - 273$$

$$p = \frac{2}{3}n\overline{W_к};$$

$$\overline{W_к} = \frac{3}{2}kT;$$

$$p = \frac{2}{3}n\cdot\frac{3}{2}kT = nkT;$$

У молекулы-шарика при движении имеются всего три степени свободы:

«вправо-влево»

«вверх-вниз»

«вперед-назад»

У молекулы-гантели к трем поступательным степеням свободы добавляются две вращательные:

Энергия равномерно распределяется по всем степеням свободы: на каждую приходится по $\frac{1}{2}kT$

абсолютной шкалы температур со стоградусной шкалой, которую часто называют шкалой Цельсия.

Для этого сначала найдем значение одной из реперных точек стоградусной шкалы, например, температуру таяния льда 0° С. Затем составим формулу для перевода значений температуры, отсчитанных по абсолютной шкале, в значения, отсчитанные по стоградусной шкале и наоборот.

Наконец, запишем в явном виде формулу связи средней кинетической энергии теплового движения структурных частиц идеального газа и его абсолютной температурой и получим: **средняя кинетическая энергия теплового движения частиц идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.**

Из этого уравнения следует, что при приближении температуры к абсолютному нулю, значение средней кинетической энергии теплового движения частиц также приближается к нулю.

Если теперь в основном уравнении МКТ выразить среднюю кинетическую энергию идеального газа через абсолютную температуру, получим уравнение, связывающее между собой давление газа и его температуру. Это уравнение можно проверить экспериментально.

Детальное изучение рассмотренного нами вопроса применительно к жидкостям и твердым телам показало, что средняя кинетическая энергия теплового движения частиц вещества также прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Однако, безразмерный коэффициент 3/2 был получен нами при рассмотрении идеального газа, а его частицы — бесструктурные маленькие упругие шарики. Они могут совершать только поступательное движение. В таких случаях говорят, что такая частица имеет «три степени свободы». А так как пространство изотропно, то на каждую степень свободы приходится энергия, численно равная половине kT.

В более сложных случаях иногда приходится учитывать строение молекулы. Тогда числовой коэффициент принимает другие значения. Например, когда молекулы двухатомные, число степеней свободы при движении увеличивается: к трем поступательным добавляются две вращательные степени свободы. В этом случае, общее число степеней свободы равно 5 и числовой коэффициент равен 5/2.

§ 28. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ МКТ

Задача 1. При никелировании изделия его покрывают слоем никеля толщиной 1,5 мкм. Сколько атомов никеля содержится в покрытии, если площадь поверхности изделия равна 800 см²?

Дано: никель
$d = 1{,}5$ мкм
$S = 800$ см²
N – ?

СИ:
$1{,}5\cdot10^{-6}$ м
$8\cdot10^{-2}$ м²

Справочные:
$\rho = 8900$ кг/м³
$M_r = 59\cdot10^{-3}$ кг/моль

Решение:

1. Число структурных частиц:

$$N = \nu N_A; \qquad \nu = \frac{m}{M} = \frac{m}{M_r\cdot10^{-3}};$$

$$N = N_A\cdot\frac{m}{M_r\cdot10^{-3}}.$$

2. Масса покрытия:

$$m = \rho V; \qquad V = Sd;$$

$$m = \rho Sd.$$

4. $$N = \frac{\rho SdN_A}{M_r\cdot10^{-3}};$$

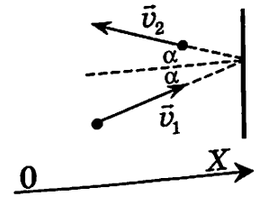
$$[N] = \left[\frac{\rho SdN_A}{M_r\cdot10^{-3}}\right] = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot\text{м}\cdot\text{моль}^{-1}}{\text{кг}\cdot\text{моль}^{-1}} = 1;$$

$$N = \frac{8900\cdot8\cdot10^{-2}\cdot1{,}5\cdot10^{-6}\cdot6{,}02\cdot10^{23}}{59\cdot10^{-3}} = 1{,}1\cdot10^{22}$$

Ответ: число молекул в покрытии $N = 1{,}1\cdot10^{22}$.

Задача 2. В потоке молекул, летящих со скоростью v под углом α к направлению движения расположена пластинка. Масса молекулы равна m_0, концентрация молекул в потоке n. Какое давление испытывает пластинка? Удары молекул о пластинку считать абсолютно упругими.

Дано:
поток молекул
v, α
m_0
n
p —?



Решение:

Для решения этой задачи нужно воспользоваться моделью давления идеального газа, лишь немного корректируя ее. В данном случае давление есть результат абсолютно упругих столкновений молекул потока (то есть частиц, движущихся в одном направлении) с пластинкой.

Так как молекулы испытывают абсолютно упругие соударения с пластинкой, то при ударе изменяется только проекция импульса молекулы на направление OX, перпендикулярное пластинке.

Следовательно, суммарное изменение проекции импульса всех молекул, испытав-

1. Изменение импульса молекулы при абсолютно упругом столкновении с пластинкой:

$$\Delta(m\vec{v}) = m_0\vec{v}_2 - m_0\vec{v}_1;$$

$$\Delta(m\vec{v})_x = m_0v_{2x} - m_0v_{1x}.$$

2. Так как столкновение абсолютно упругое, то:

$$|\vec{v}_2| = |\vec{v}_1|; \quad v_{2x} = -v_{1x}; \quad v_{2y} = v_{1y}.$$

3. За $t = 1$ с столкновения с пластинкой испытают: $N = nv_{1x}tS$ молекул, а их изменение импульса составит:

$$N(m_0v_{2x} - m_0v_{1x}) = nv_{1x}tS(m_0v_{2x} - m_0v_{1x}).$$

3. По второму закону Ньютона:

$$F_x t = n v_{1x} t S (m_0 v_{2x} - m_0 v_{1x}).$$

4. По третьему закону Ньютона:

$F_x = -F_\perp$, тогда:

$$p = \frac{F_\perp}{S} = -\frac{n v_{1x} S (m_0 v_{2x} - m_0 v_{1x})}{S} =$$
$$= n v_{1x} (m_0 v_{1x} - m_0 v_{2x});$$

$$v_{1x} = v \sin\alpha; \quad v_{2x} = -v \sin\alpha;$$

$$p = 2 n m_0 v^2 \sin^2 \alpha.$$

Дано: *СИ:*
$V = 0{,}5$ л $5 \cdot 10^{-4}$ м^3
$p = 5 \cdot 10^5$ Па
$v_{ср.кв.} = 500$ м/с
m — ?

Решение:

1. Из основного уравнения МКТ и физического смысла плотности:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}; = \frac{1}{3} \frac{(N \cdot m_0)}{V} \overline{v^2} = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n;$$

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}.$$

2. Отсюда, выражая плотность газа, рассчитаем его массу:

$$m = \rho V = \frac{3pV}{\overline{v^2}}.$$

3. $$[m] = \left[\frac{3pV}{\overline{v^2}}\right] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}} = \text{кг};$$

$$m = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{500^2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{(кг)}.$$

Ответ: масса газа в сосуде равна 3 г.

Дано: *СИ:*
броуновская частица
сферической формы
$r = 1$ мкм 10^{-6} м
$\rho = 1{,}3$ г/см^3 $1{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3
$t^\circ = 27^\circ$C 300 К
$v_{ср.кв.}$ — ?

ших столкновение с пластинкой за большой промежуток времени, в направлении OX и определит значение силы давления на пластинку.

Посчитаем число молекул, испытавших соударения с пластинкой за 1 с (это время значительно больше времени столкновения молекулы с пластинкой), и найдем изменение импульса всех молекул за это время.

Используя второй и третий законы Ньютона, определим силу давления, а затем и давление потока на пластинку.

Так как все молекулы потока движутся с одинаковыми скоростями, то усреднения скоростей не требуется.

Задача 3. Чему равна масса газа, содержащегося в закрытом сосуде вместимостью 0,5 л, если средняя квадратичная скорость движения молекул равна 500 м/с, а давление газа составляет $5 \cdot 10^5$ Па?

Для решения задачи воспользуемся основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

Исходя из определения плотности и используя молекулярно-кинетическую трактовку массы газа, как суммы масс всех его структурных частиц, получим удобную для использования во многих случаях формулу, связывающую давление идеального газа с его плотностью и средним квадратом скорости движения молекул.

Выражая из полученной формулы плотность и умножая ее на объем сосуда, найдем массу газа в нем.

При проверке размерности полученного выражения представим ньютон через основные единицы СИ, пользуясь его определением из второго закона Ньютона.

Проведя расчеты, обратите внимание на полученное значение массы — всего 3 г! Однако, в сосуде вместимостью 0,5 л они создают давление примерно в 5 раз большее нормального атмосферного давления.

Задача 4. В воздухе взвешены пылинки приблизительно сферической формы. Радиус пылинки 1 мкм, а плотность вещества 1,3 г/см^3. Определите среднюю квадратичную скорость движения пылинок при температуре воздуха 27°C.

Так как пылинки совершают броуновское движение, а его характерными чертами являются непрерывность и хаотичность, как у теплового движения, то и броуновское движение частиц можно считать тепловым движением.

Решение:

1. Так как движение броуновской частицы – тепловое, то по определению температуры получим:

$$\overline{W_к} = \frac{3}{2} kT; \qquad \overline{W_к} = \frac{m_{бр} \overline{v^2}}{2};$$

$$\frac{m_{бр} \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT; \quad \overline{v^2} = \frac{3kT}{m_{бр}}; \quad v_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{бр}}}.$$

2. Так как форма частицы – сфера, то:

$$m_{бр} = \rho V = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3;$$

$$v_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{9kT}{4\pi r^3 \rho}}.$$

$$[v]_{ср.кв.} = \left[\sqrt{\frac{9kT}{4\pi r^3 \rho}}\right] = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{К}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}}\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{ср.кв.} = \sqrt{\frac{9 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-18} \cdot 1{,}3 \cdot 10^3}} = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).$$

Ответ: средняя квадратичная скорость броуновской частицы составляет примерно 1,5 мм/с при температуре 27°C.

Дано: *Справочные:*
азот, N_2 $M_{r1} = 28$
водород, H_2 $M_{r2} = 2$
$N_1 = N_2$
$V = \text{const}$
$T = \text{const}$
$m_1 : m_2$; $\overline{W_1} : \overline{W_2}$; $v_{ср.кв.1} : v_{ср.кв.2}$; $p_1 : p_2$ – ?

Решение:

1. Найдем отношение масс газов в смеси:

$$m_1 = m_{01} N_1 = \frac{M_1}{N_A} N_1 = \frac{M_{r1} \cdot 10^{-3}}{N_A} N_1;$$

$$m_2 = m_{02} N_2 = \frac{M_2}{N_A} N_2 = \frac{M_{r2} \cdot 10^{-3}}{N_A} N_2;$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_{r1} N_1}{M_{r2} N_2} = \frac{M_{r1}}{M_{r2}} = \frac{28}{2} = 14.$$

2. $\overline{W_{к1}} = \overline{W_{к2}}$, так $T_1 = T_2$, то есть: $\overline{W_{к1}} : \overline{W_{к2}} = 1$.

3. $$\overline{W_{к1}} = \frac{m_{01} \overline{v_1^2}}{2}; \quad \overline{W_{к2}} = \frac{m_{02} \overline{v_2^2}}{2}; \quad m_{01} \overline{v_1^2} = m_{02} \overline{v_2^2};$$

$$\frac{v_{ср.кв.1}}{v_{ср.кв.2}} = \sqrt{\frac{m_{02}}{m_{01}}} = \sqrt{\frac{M_{r2}}{M_{r1}}} = \sqrt{\frac{2}{28}} \approx 0{,}3.$$

4. $p_1 = n_1 k T_1$; $p_2 = n_2 k T_2$; то есть: $p_1 : p_2 = 1$.

В этом случае все выводы, справедливые для теплового движения частиц, применимы и для броуновских частиц.

Тогда пользуясь определением температуры как меры средней кинетической энергии движения частиц, получим выражение для среднего квадрата скорости движения броуновской частицы.

Извлекая квадратный корень из этого числа, получим среднюю квадратичную скорость броуновской частицы.

При проверке размерности полученного результата выразим джоуль через основные единицы СИ по определению джоуля.

Обратите внимание на полученное значение средней квадратичной скорости теплового движения броуновской частицы: из-за большой массы (по сравнению с массой молекул) эта скорость при температуре 27°C составляет несколько миллиметров в секунду.

Задача 5. Смешиваются азот и водород в сосуде так, что число молекул каждого газа одинаково. Каково отношение: а) масс газов; б) средних кинетических энергий молекул; в) средних квадратичных скоростей движения молекул; г) парциальных давлений газов. Температура газов одинакова и постоянна.

Так как число структурных частиц в обоих газах одинаково, то отношение их масс равно отношению масс молекул каждого из газов.

Массу молекулы найдем, зная молярную массу газа (ее можно найти по известной химической формуле газа) и число Авогадро. Молярная масса газа, в свою очередь, пропорциональна относительной массе молекулы. Следовательно, отношение масс газов в данном случае равно отношению относительных масс молекул этих газов.

Отношение средних кинетических энергий движения молекул этих газов равно единице, так как температура газов одинакова. Из равенства средних кинетических энергий можно получить значение отношения средних квадратичных скоростей.

Отношение давлений также равно единице, так как одинаковы температуры и число структурных частиц газов.

Дано:
два разных газа
p_1; N_1;
p_2; N_2;
$T = \text{const}$
p —?

Решение:
1. До того, как кран был открыт:

$$p_1 = n_1 kT; \qquad p_2 = n_2 kT;$$

$$n_1 = \frac{N_1}{V_1}; \qquad n_2 = \frac{N_2}{V_2};$$

Следовательно:

$$p_1 V_1 = N_1 kT; \qquad p_2 V_2 = N_2 kT;$$

2. После того, как кран был открыт, в сосуде объемом $(V_1 + V_2)$ установилось давление p:

$$p(V_1 + V_2) = (N_1 + N_2)kT;$$

$$p\left(\frac{N_1 kT}{p_1} + \frac{N_2 kT}{p_2}\right) = (N_1 + N_2)kT;$$

$$p = \frac{(N_1 + N_2)p_1 p_2}{N_1 p_2 + N_2 p_1}.$$

Дано:
$\rho = 0{,}0009$ г/см^3
$p_1 = 80$ кПа
$p_2 = 110$ кПа
$(\upsilon_{\text{ср. кв.2}} - \upsilon_{\text{ср.кв.1}})$ —?

СИ:
0,9 кг/м^3
$8 \cdot 10^4$ Па
$1{,}1 \cdot 10^5$ Па

Решение:
1. Запишем основное уравнение МКТ, выражая концентрацию газа через его плотность:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{\upsilon^2} = \frac{1}{3}\rho \overline{\upsilon^2}.$$

2. Выразим значение среднего квадрата скорости и найдем среднюю квадратичную скорость:

$$\overline{\upsilon^2} = \frac{3p}{\rho}; \quad \upsilon_{\text{ср. кв.1}} = \sqrt{\frac{3p_1}{\rho}}; \quad \upsilon_{\text{ср. кв.2}} = \sqrt{\frac{3p_2}{\rho}};$$

тогда: $\upsilon_{\text{ср. кв.2}} - \upsilon_{\text{ср. кв.1}} = \sqrt{\frac{3p_2}{\rho}} - \sqrt{\frac{3p_1}{\rho}};$

$$\upsilon_{\text{ср. кв.2}} - \upsilon_{\text{ср. кв.1}} = \sqrt{\frac{3}{\rho}}\left(\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}\right);$$

$$\upsilon_{\text{ср. кв.2}} - \upsilon_{\text{ср. кв.1}} = \sqrt{\frac{3}{0{,}9}}\left(\sqrt{1{,}1 \cdot 10^5} - \sqrt{8 \cdot 10^4}\right) =$$

$$= 1{,}8 \cdot (3{,}3 - 2{,}8) \cdot 10^2 \approx 90 \text{ (м/с)}$$

Задача 6. Два сосуда, содержащие различные газы, соединены между собой короткой тонкой трубкой с краном. Давление газа и число частиц в первом сосуде соответственно равны p_1 и N_1. Давление газа во втором сосуде p_2, а число молекул в нем N_2. Какое давление установится в сосуде, если кран соединительной трубки открыть? Температура газов одинакова и постоянна.

Пользуясь определением концентрации молекул газа, выразим из основного уравнения МКТ объемы сосудов.

После открывания крана в соединительной трубке газы самопроизвольно перемешиваются вследствие диффузии.

Теперь образовавшаяся смесь газов занимает объем, равный сумме объемов сосудов. (Так как соединительная трубка короткая и тонкая, ее объемом по сравнению с объемом сосудов можно пренебречь.)

Давление этой смеси при данной температуре в суммарном объеме определяется суммой структурных частиц каждого газа. Проводя несложные преобразования, получим выражение для установившегося в сообщающихся сосудах давления газа.

Задача 7. Плотность газа в баллоне электрической лампы равна 0,0009 г/см^3. При работе лампы давление в ней возросло от 80 кПа до 110 кПа. На сколько при этом увеличилась средняя квадратичная скорость молекул?

Запишем основное уравнение МКТ, используя связь между плотностью и концентрацией молекул газа.

Выразим из полученного равенства средний квадрат скорости движения молекул газа.

Извлекая из среднего квадрата скорости квадратный корень, получим значение средней квадратичной скорости.

Это значение равно корню квадратному из отношения утроенного давления газа к его плотности.

Предполагая, что при нагревании баллона лампы его объем практически не меняется и газ из баллона не вытекает, получаем, что плотность газа при нагревании в баллоне не меняется.

Тогда можно найти значение средней квадратичной скорости молекул газа при разных значениях давления, а затем найти изменение этой скорости.

Дано:
$N_1 = N_2$
$\upsilon_{\text{ср.кв.1}} = 300$ м/с
$\upsilon_{\text{ср.кв.1}} = 400$ м/с
тепловое равновесие
$\upsilon_{\text{ср.кв.1}}$ — ?

Решение:
1. Найдем суммарную среднюю кинетическую энергию молекул газа в первом и втором сосудах:

$$\overline{W}_{\text{к1}} = \frac{m_0 \overline{\upsilon_1^2}}{2}; \qquad N_1 \overline{W}_{\text{к1}} = N_1 \frac{m_0 \overline{\upsilon_1^2}}{2};$$

$$\overline{W}_{\text{к2}} = \frac{m_0 \overline{\upsilon_2^2}}{2}; \qquad N_2 \overline{W}_{\text{к2}} = N_2 \frac{m_0 \overline{\upsilon_2^2}}{2};$$

$$N_1 \overline{W}_{\text{к1}} + N_2 \overline{W}_{\text{к2}} = N_1 \frac{m_0 \overline{\upsilon_1^2}}{2} + N_2 \frac{m_0 \overline{\upsilon_2^2}}{2}.$$

2. Так как передачей энергии стенкам сосудов после открывания крана можно пренебречь, то:

$$N_1 \overline{W}_{\text{к1}} + N_2 \overline{W}_{\text{к2}} = (N_1 + N_2)\overline{W}_{\text{к тепл. равн}};$$

$$\overline{W}_{\text{к тепл. равн}} = \frac{m_0 \overline{\upsilon^2}_{\text{тепл. равн}}}{2};$$

$$(N_1 + N_2)\frac{m_0 \overline{\upsilon^2}_{\text{тепл. равн}}}{2} = N_1 \frac{m_0 \overline{\upsilon_1^2}}{2} + N_2 \frac{m_0 \overline{\upsilon_2^2}}{2};$$

$$2N\overline{\upsilon^2}_{\text{тепл. равн}} = N\overline{\upsilon_1^2} + N\overline{\upsilon_2^2};$$

$$\overline{\upsilon^2}_{\text{тепл. равн}} = \frac{1}{2}\left(\overline{\upsilon_1^2} + \overline{\upsilon_2^2}\right); \qquad \upsilon_{\text{тепл. равн}} = \frac{\sqrt{\overline{\upsilon_1^2} + \overline{\upsilon_2^2}}}{\sqrt{2}};$$

$$\upsilon_{\text{тепл. равн}} = \frac{\sqrt{300^2 + 400^2}}{\sqrt{2}} = \frac{500}{1{,}41} \approx 355\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).$$

Алгоритм решения задач
1. *Установить, можно ли считать газ идеальным в условиях, описанных в задаче;*
2. *Уяснить, идет ли речь в задаче об одном состоянии газа или с газом происходит некоторый процесс (переход в другое состояние);*
3. *В случае, когда с газом происходит некоторый процесс, выявить постоянные и изменяющиеся параметры, характеризующие газ или его структурные частицы;*
4. *Записать основное уравнение МКТ или его основное следствие;*
5. *Воспользоваться формулами связи между микро– и макропараметрами газа;*
6. *Составить уравнение для неизвестного параметра и решить его.*

Задача 8. В двух одинаковых сосудах, соединенных краном, содержится одинаковое число молекул идеального газа. Средняя квадратичная скорость молекул газа в одном сосуде равна 300 м/с, а в другом — 400 м/с. Какой станет средняя квадратичная скорость молекул газа после открытия крана и установления теплового равновесия?

После открытия крана молекулы газа перераспределяются по всему (суммарному) объему сосудов. Между молекулами происходят столкновения, которые приводят к перераспределению энергии.

Оно происходит до тех пор, пока средние кинетические энергии молекул газа не станут одинаковыми (то есть пока температура смеси газа не станет одинаковой, что свидетельствует о наступлении состояния теплового равновесия).

Будем предполагать, что при взаимодействии со стенками сосудов, передачи энергии стенкам не происходит, то есть столкновения молекул со стенками по-прежнему абсолютно упругие.

Тогда сумма энергий, которыми обладали молекулы газа в каждом из сосудов, будет равна энергии всех молекул после установления теплового равновесия.

Это равенство позволяет найти среднюю квадратичную скорость молекул после установления теплового равновесия.

Так как массы молекул газов одинаковы и первоначальное число частиц в каждом сосуде одно и то же, то после простых преобразований получим выражение для средней квадратичной скорости скорости в состоянии теплового равновесия.

Итак, рассмотрев типовые задачи на использование основного уравнения МКТ и других соотношений между макроскопическими параметрами газа и микроскопическими параметрами молекул (структурных частиц) идеального газа, составим алгоритм решения подобных задач.

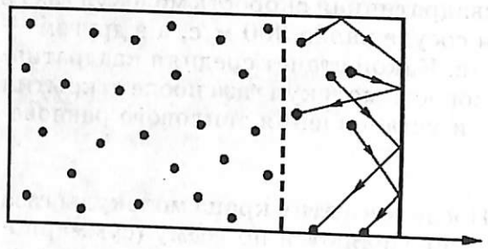
В заключение снова обратим внимание читателя на физический смысл понятия «тепловое равновесие».

Оно означает следующее:

а) температура всех тел в состоянии равновесия одинакова ;

б) средние кинетические энергии движения структурных частиц этих тел одинаковы.

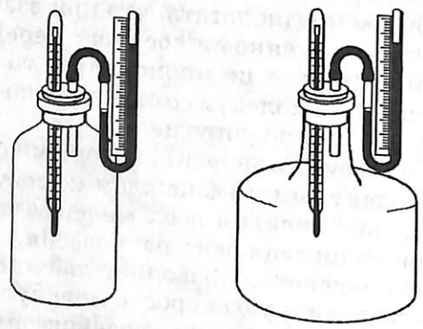
§ 29. РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2};$$

$$\overline{W_к} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT;$$

$$p = nkT.$$



Макроскопические параметры характеризуют равновесное состояние газа

Название параметра	Обозначение	Единица	Прибор
Объем	V	м³	мерный сосуд
Давление	p	Па	манометр
Температура	T	К	термометр
Масса	m	кг	весы с гирями

Уравнение, устанавливающее связь давления газа с его объемом и температурой, называется ***уравнением состояния.***

Пользуясь моделью идеального газа и предложенным механизмом для объяснения давления, нам удалось получить основное уравнение идеального газа. Оно позволило установить связь между давлением газа и микроскопическими характеристиками частиц, из которых газ состоит.

Выяснение физического смысла температуры позволило нам получить из основного уравнения в качестве следствия уравнение, которое констатирует факт наличия взаимосвязи между макроскопическими параметрами газа — его давлением, объемом и температурой.

Однако, этот факт был хорошо известен в науке: задолго до создания молекулярно-кинетической теории были установлены законы, описывающие протекание разных процессов в газах и устанавливающие вид зависимости между перечисленными макроскопическими параметрами.

Поэтому совпадение результатов теоретического исследования с результатами физического эксперимента можно рассматривать как подтверждение справедливости молекулярно-кинетической теории.

Теперь обратимся к изучению процессов в газах, которые имеют важное практическое значение как для описания многих тепловых явлений, так и для работы многочисленных технических устройств. Но прежде сделаем некоторые предварительные замечания.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории и его следствия по своей сути представляют собой уравнения, описывающие состояние рассматриваемой системы. Действительно, определенные нами макроскопические параметры имеют смысл только тогда, когда система находится в состоянии теплового равновесия.

Если же мы будем рассматривать процесс, например, процесс уменьшения объема газа, то сразу возникнет вопрос о том, в каком месте сосуда следует расположить трубку манометра для измерения давления. Ведь непосредственно под поршнем концентрация частиц газа окажется больше (а при быстром движении поршня, значительно больше), чем в других частях сосуда. Что же в этом случае нужно будет считать давлением газа «в процессе его сжатия»?

$$p = nkT;$$

$$n = \frac{N}{V};$$

$$p = \frac{N}{V} kT.$$

Если $N = \text{const}$, то:

$$\frac{pV}{T} = kN = \text{const}.$$

Произведение давления данной массы идеального газа на его объем, отнесенное к его абсолютной температуре есть величина постоянная. (Значение этой постоянной есть произведение универсальной постоянной Больцмана на число структурных частиц в рассматриваемом газе, то есть она не является универсальной.)

$N = \text{const}$ $(m = \text{const})$

I состояние: p_1; V_1; T_1;

II состояние: p_2; V_2; T_2.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Б. П. Клапейрон
1799 — 1864

В зависимости от того, как быстро происходит процесс во времени, принято делить все процессы на равновесные и неравновесные. Если процесс происходит так медленно, что успевает установиться новое состояние равновесия с новыми значениями давления газа, его температуры и объема, то говорят, что этот процесс **равновесный**. Равновесные процессы являются **обратимыми.**

Действительно, если после медленного сжатия проводить равновесный процесс в обратном направлении — медленно расширять газ — то он пройдет через ту же последовательность равновесных состояний, что и при сжатии. Закономерности в протекании таких процессов наиболее просты.

Если процесс проводится быстро и состояние равновесия не успевает установиться, то его называют **неравновесным. Неравновесные процессы необратимы.** Например, под поршнем при резком сжатии газа давление сначала больше, чем во всем сосуде, а при резком расширении — меньше.

Реальные процессы, конечно, не могут протекать «бесконечно медленно», поэтому фактически они всегда неравновесные и необратимые. Однако, если время изменения состояния велико по сравнению с временем релаксации (то есть, временем установления равновесия), то процесс можно считать приблизительно равновесным и обратимым. Именно такие процессы мы и будем изучать в дальнейшем.

Обратимся к уравнению, устанавливающему связь между давлением идеального газа и его температурой. Выразим концентрацию газа через число частиц газа и объем, занимаемый газом, пользуясь определением. Теперь преобразуем выражение, перенося в одну часть макроскопические параметры p, V, T. Если с газом производится процесс, в котором число структурных частиц не меняется (а это значит, что и масса газа остается в процессе постоянной), то в другой части остаются только постоянные величины. Таким образом, **для данной массы газа произведение давления газа на его объем, отнесенное к абсолютной температуре, есть величина постоянная.**

Это вербальная формулировка уравнения состояния идеального газа, которое определяет связь его температуры, давления и объема. Оно называется также уравнением Б. Клапейрона, по имени французского физика, впервые получившего его

Д. И. Менделеев
1834 — 1907

$$N = \nu N_A;$$

$$\nu = \frac{m}{M};$$

$$N = \frac{m}{M} N_A;$$

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} N_A \cdot k;$$

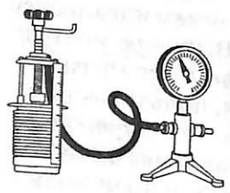
$$N_A \cdot k \equiv R$$

R – универсальная газовая постоянная;

$$R = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}};$$

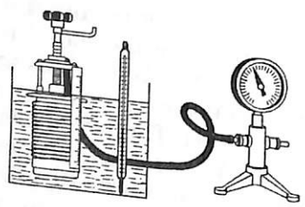
$$R = 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

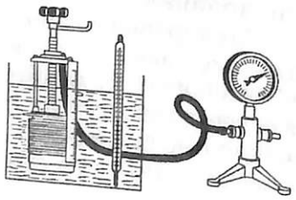
$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R \quad \text{или} \quad pV = \frac{m}{M} RT.$$



Начальное состояние данной массы газа: p_1, V_1, T_1.

Промежуточное состояние данной массы газа: $p_2 = p_1; V_2, T_2$.





Конечное состояние данной массы газа: $p_3, V_3, T_3 = T_2$.

опытным путем. Это уравнение, во-первых, позволяет рассчитать одну из величин, характеризующих состояние газа, если известны две другие.

Во-вторых, зная уравнение, можно предсказать, какие процессы и как будут происходить в данной системе при определенных внешних условиях. Например, как будет меняться давление газа, если при неизменной температуре медленно уменьшать его объем.

Наконец, в-третьих, уравнение состояния позволяет определить, как будет меняться состояние системы, если она будет совершать работу или обмениваться теплотой с окружающими телами.

Из исходного уравнения можно получить уравнение, которое носит название уравнения Менделеева-Клапейрона, если выразить число структурных частиц газа через постоянную Авогадро и количество вещества. Если же воспользоваться для определения количества вещества массой газа и его молярной массой, то все макроскопические параметры газа: масса, давление, объем и температура, а также молярная масса, зависящая от химической природы газа, войдут в это уравнение.

В качестве постоянной в этом уравнении фигурирует произведение двух универсальных физических постоянных: числа Авогадро и постоянной Больцмана. Это — универсальная газовая постоянная, ее значение было первоначально получено опытным путем при изучении процессов в газе.

Заметим, что теоретический расчет этой постоянной дает результат, прекрасно согласующийся с экспериментальными данными, что еще раз подтверждает справедливость молекулярно-кинетической теории. Уравнение Менделеева-Клапейрона явилось первым из замечательных обобщений в физике, с помощью которого свойства разных веществ выражаются через одни и те же основные величины.

На рисунке показан общий вид установки, при помощи которой можно экспериментально получить уравнение состояния для данной массы «идеального» газа.

Для этого нужно последовательно провести два процесса, в которых одна из трех величин поддерживается постоянной. Такие процессы — они называются изопроцессами, — исторически были изучены раньше других. Мы рассмотрим их в следующем параграфе.

§ 30. ИЗОПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Изотермическим называется процесс, происходящий с данной массой идеального газа при постоянной температуре.

$$m = \text{const}; \quad M = \text{const};$$

$$T = \text{const}.$$

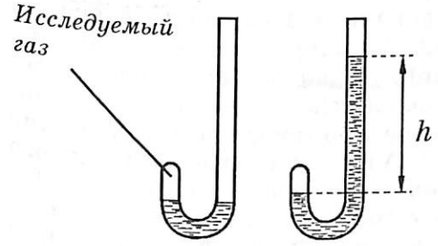
Следовательно:

$$pV = \text{const}.$$

Другие формы записи закона:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2;$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

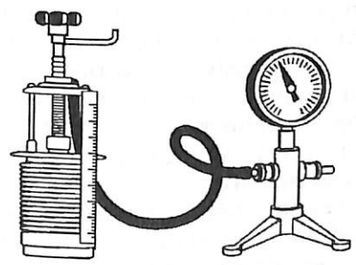


$T = T_{\text{окружающего воздуха}}$

$V_1;\ p_1 = p_{\text{атм}};$ $V_2;\ p_2 = p_{\text{атм}} + \rho g h;$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2;$$

$$p_{\text{атм}} V_1 = (p_{\text{атм}} + \rho g h) V_2.$$



Закон Бойля-Мариотта можно проверить в кабинете физики при помощи сильфона, гофрированного сосуда, объем которого можно менять путем поворота винта. Давление воздуха в сильфоне можно измерять манометром.

Пользуясь уравнением состояния идеального газа или уравнением Менделеева-Клапейрона, нетрудно получить газовые законы, которые описывают изопроцессы с идеальным газом.

Изопроцессы являются самыми простыми процессами с идеальным газом, так как три из пяти макроскопических параметров, описывающих его состояние: масса, молярная масса и температура (или объем, или давление) поддерживаются постоянными.

Таким образом, любой изопроцесс проводится с постоянной массой газа, химическая природа которого в процессе не меняется, и в нем изучается количественная зависимость между двумя параметрами.

Общее название процесса образуется при помощи двух слов. Первое происходит от греческого слова «isos» — равный, а второе от греческих слов «therme» — тепло (изотермический процесс); «baros» — тяжесть, вес (изобарный процесс) или «chora» — занимаемое место (изохорный процесс).

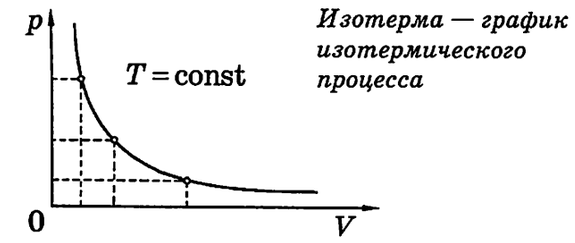
Первый газовый закон был открыт независимо друг от друга двумя учеными в 1660 году: англичанином Р. Бойлем и французом Э. Мариоттом, и носит название закона Бойля-Мариотта. Этот закон описывает **изотермический процесс**.

Процесс изменения состояния данной массы газа при постоянной температуре называется изотермическим процессом.

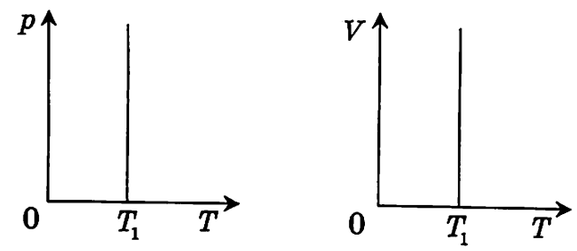
Для проведения опытов необходимо было поддерживать постоянной температуру исследуемого газа. В качестве термостата можно использовать атмосферный воздух, если его температура не меняется на протяжении опыта. На рисунке приведен прибор Бойля. Это изогнутая трубочка, в которой некоторая масса воздуха «заперта» столбиком ртути. Доливая ртуть в открытую часть трубочки, можно было изменять давление газа. При этом, конечно, изменялся и его объем.

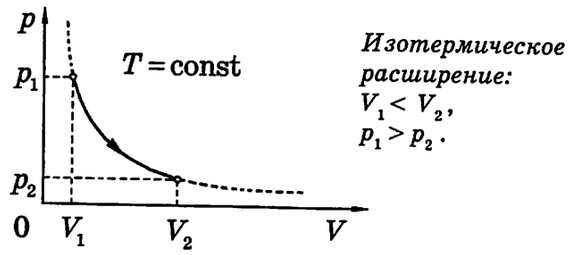
Поскольку масса воздуха в трубке мала, а сам опыт проводился сравнительно медленно, то температура воздуха оставалась постоянной и равной температуре окружающей среды.

Полученная экспериментально зависимость между давлением газа и его объемом при постоянной температуре полностью совпадает с выводами, которые мы

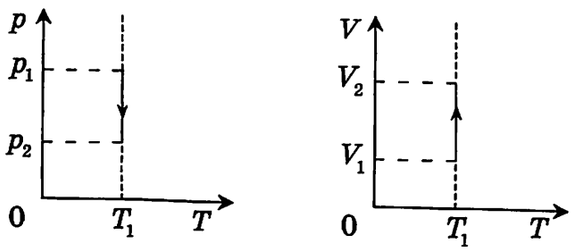


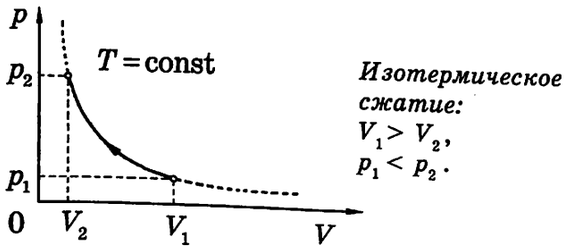
Изотерма — график изотермического процесса





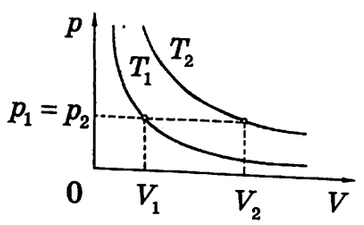
Изотермическое расширение:
$V_1 < V_2$,
$p_1 > p_2$.

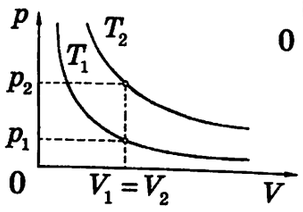




Изотермическое сжатие:
$V_1 > V_2$,
$p_1 < p_2$.

$T_2 > T_1$, *так как при* $p_1 = p_2$
$V_2 > V_1$.





$T_2 > T_1$, *так как при* $V_1 = V_2$
$p_2 > p_1$.

получили выше из уравнения состояния. Их можно сформулировать следующим образом: **произведение давления данной массы газа на его объем при постоянной температуре есть величина постоянная.**

Границы применимости этого закона вытекают из условия, что свойства реального газа должны приближаться к свойствам идеального. Это означает, что газ должен быть достаточно разреженным. Как показывает опыт, это условие выполняется вплоть до давлений в десятки раз превышающих атмосферное. При давлениях, больших атмосферного в сотни раз, отклонения от закона становятся существенными.

При изучении газовых законов удобно пользоваться графическим представлением информации. На рисунках приведены графики изотермических процессов в координатных осях (p,T), (p,V) и (V,T). Обратите внимание: математическая линия, выражающая зависимость между двумя величинами, охватывает всю область допустимых значений переменных, а график физического процесса, во-первых, ограничен реальными интервалами изменения значений параметров, и во-вторых, имеет «направление». Например, название процесса «изотермическое сжатие» означает, что в данном процессе происходило уменьшение объема газа. А в процессе изотермического расширения объем газа увеличивается. Таким образом, направление процесса указывает на то, как изменялся в опыте тот или иной термодинамический параметр — увеличивался или уменьшался.

Закон Бойля-Мариотта имеет простое молекулярно-кинетическое истолкование. Проведем его для процесса изотермического сжатия. Так как этот процесс происходит при постоянной температуре, а она является мерой средней кинетической энергии движения молекул газа, то в данном процессе не меняется средняя кинетическая энергия молекул. Тогда изменение давления газа связано только с изменением его концентрации. А так как число частиц остается постоянным (ведь масса газа не меняется в изопроцессах), то при уменьшении объема газа в несколько раз концентрация частиц увеличивается во столько же раз. Давление, также как концентрация, увеличивается во столько раз, во сколько уменьшился его объем. Поэтому произведение давления газа на его объем в этом процессе остается постоянным.

$m = \text{const}$; $M = \text{const}$;

$p = \text{const}$;

следовательно:

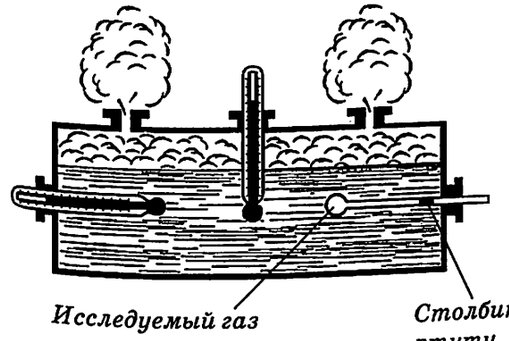
$$pV = \frac{m}{M}RT, \qquad V = \frac{m}{Mp}RT;$$

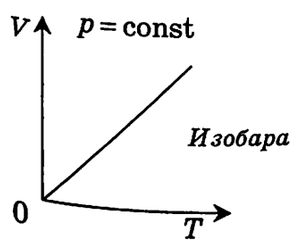
$$\frac{V}{T} = \text{const}.$$

Другие формы записи закона:

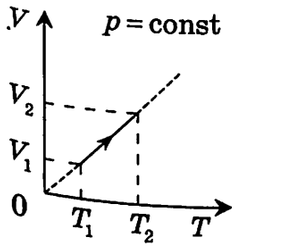
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$

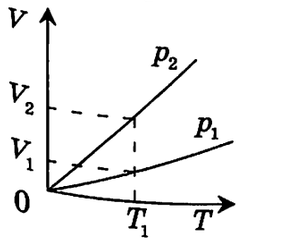
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

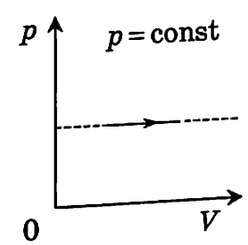


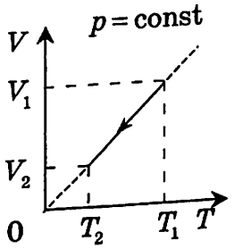


Изобара









$p_1 > p_2$, *так как при* $T_1 = \text{const}$
$V_1 < V_2$.

Процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном давлении называется изобарным.

В этом процессе происходит изменение объема газа при изменении его температуры. Вывод этого закона из уравнения состояния аналогичен выводу закона Бойля-Мариотта. Из полученного уравнения следует, что при увеличении температуры газа в несколько раз его объем также увеличивается во столько же раз, если давление газа поддерживается постоянным.

Объем данной массы идеального газа прямо пропорционален его абсолютной температуре при постоянном давлении.

Сообщение об открытии этого закона было опубликовано в 1802 году. Он был установлен французским физиком Гей-Люссаком. На рисунке показан прибор, при помощи которого этот закон был установлен.

В опыте измерялось значение объема воздуха, запертого в цилиндрической трубке столбиком ртути. Трубка располагалась горизонтально, поэтому давление воздуха в ней было равно атмосферному на всем протяжении опыта и не менялось.

Для того, чтобы можно было изменять температуру воздуха в трубке, ее помещали в сосуд с водой, которую нагревали при помощи специального нагревателя от 0°C до 100 °C.

Изменение объема воздуха в трубке обнаруживали по изменению положения столбика ртути в трубке.

Так как объем идеального газа в данном процессе прямо пропорционален его температуре, то графиком такой зависимости в координатных осях (V,T) является прямая линия, выходящая из начала координат. Угол наклона прямой к оси температур зависит для данной массы газа от значения давления, он увеличивается при уменьшении давления. При изобарном нагревании происходит расширение газа, а при изобарном охлаждении газ сжимается, его объем уменьшается.

Молекулярно-кинетическое обоснование этого процесса вытекает из основного уравнения МКТ. Так как давление идеального газа остается постоянным, то увеличение средней кинетической энергии молекул должно сопровождаться пропорциональным уменьшением концентрации газа. Следовательно, при неизменном числе молекул газа его объем должен увеличиваться пропорционально температуре.

$m = \text{const}$; $M = \text{const}$;

$V = \text{const}$;

следовательно:

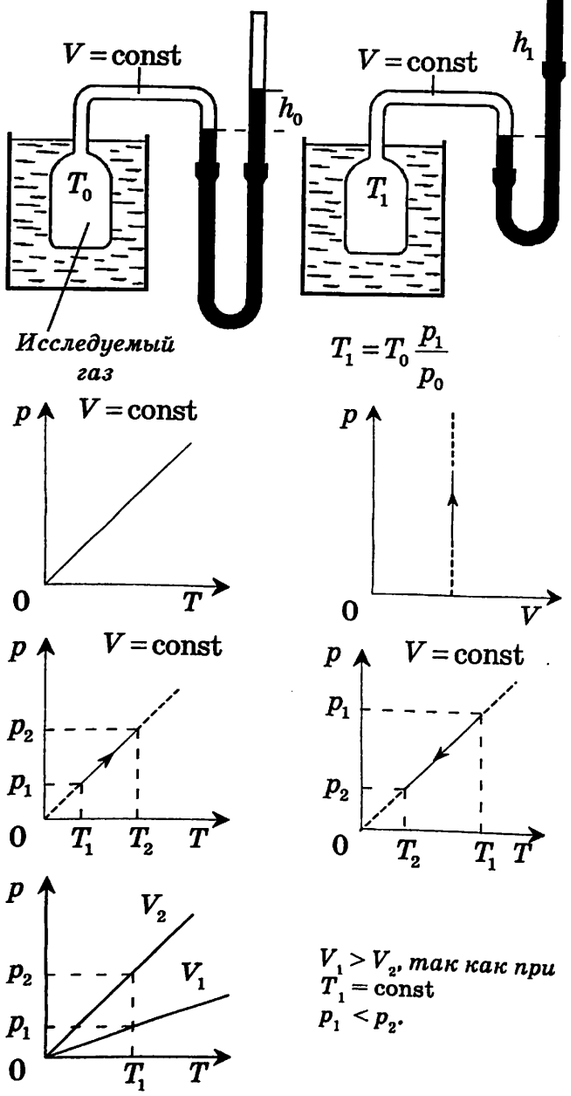
$$pV = \frac{m}{M}RT; \qquad p = \frac{m}{MV}RT;$$

$$\frac{p}{T} = \text{const}.$$

Другие формы записи закона:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$



$V_1 > V_2$, *так как при* $T_1 = \text{const}$ $p_1 < p_2$.

Процесс изменения состояния данной массы идеального газа при постоянном объеме называется изохорным.

В этом процессе изменяется давление газа в зависимости от его температуры. Вывод этого закона из уравнения состояния идеального газа полностью аналогичен выводу предыдущих газовых законов.

Из уравнения закона следует, что давление данной массы газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре газа.

Это означает, что при повышении температуры газа (изохорное нагревание) происходит пропорциональное увеличение его давления. Напротив, в процессе изохорного охлаждения происходит уменьшение давления идеального газа.

Этот закон был установлен французским физиком Ж. Шарлем в 1787 году. На рисунке показан газовый термометр постоянного объема — прибор, принцип действия которого основан на законе Шарля. Рабочее тело термометра — газ (обычно, это азот, аргон или гелий) — заполняет сосуд, соединенный гибкой трубкой с ртутным манометром.

Сначала измеряют давление газа, занимающего некоторый объем при фиксированной температуре T_0. Затем погружают сосуд с газом в среду, температуру которой нужно измерить.

Поднимая или опуская трубку манометра так, чтобы восстановить исходный объем газа, снова измеряют его давление. Теперь остается рассчитать искомую температуру.

График изохорного процесса в координатах (p,T) представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат. Угол наклона к оси температур графика, называемого изохорой, зависит для данной массы газа от занимаемого им объема. Он увеличивается при уменьшении объема газа.

Молекулярно-кинетическое обоснование закона Шарля вытекает из основного уравнения молекулярно-кинетической теории. Так как объем газа в изохорном процессе не меняется, то концентрация молекул газа остается постоянной.

Тогда увеличение температуры газа приводит к пропорциональному возрастанию средней кинетической энергии теплового движения молекул, а вслед за этим, пропорционально увеличивается и давление газа.

§ 31. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ И УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Алгоритм решения задач

1. На основе текста задачи высказать предположение о том, можно ли в данном случае считать газ идеальным, а процесс — равновесным.

2. Выбрать два (или, если требуется, три) состояния газа, изобразить рисунок и выписать для каждого из состояний значения всех термодинамических параметров.

3. Исходя из ситуации (или рисунка), выяснить, как можно найти объем газа (исходя из геометрических соображений) и давление газа, учитывая наличие атмосферного давления и закона Паскаля. Записать соответствующие выражения для этих параметров.

4. Выделить параметры, которые в рассматриваемом процессе не меняются.

5. Записать соответствующий каждой ситуации газовый закон, выбрав форму записи, в которой сравниваются изменяющиеся параметры.

6. Решить уравнение (или систему уравнений, если рассматривается несколько последовательных процессов) и найти неизвестные величины.

7. Провести анализ ответа и проверить его правдоподобность.

При решении большинства задач по этой теме школьного курса физики мы будем предполагать, что имеем дело с газом, свойства которого позволяют считать его идеальным газом. Кроме того, будем исходить из того, что все описываемые процессы происходят довольно медленно, так что их можно отнести к числу равновесных и обратимых.

Для решения большинства задач по этой теме можно применять алгоритм, который мы сформулировали для решения задач с применением законов сохранения. Действительно, ведь и в этом случае мы имеем дело с законами, которые связывают между собой параметры, характеризующие состояние газа, а не процесс.

Вспомните: понятия давления, объема и температуры имеют смысл только тогда, когда состояние газа уже не меняется.

При решении задач на газовые законы удобно пользоваться законами Авогадро и Дальтона, известными вам из курса химии.

Но поскольку для нас всегда важен физический смысл применяемых законов, решению задач по теме мы предварим рассмотрение этих законов, понимая их как следствие основного уравнения МКТ.

Ситуация 1. В сосуде объемом V находится смесь газов. Число структурных частиц каждого сорта равно соответственно N_1, N_2, N_3,..., $N_к$. Каким будет давление газа в сосуде при температуре T ?

Данная ситуация — не надуманная, с ней мы часто имеем дело на практике. Например, воздух представляет собой смесь азота, кислорода, углекислого и других газов. В создании давления принимают участие все компоненты смеси. При этом молекулы каждого сорта движутся по всему объему. Следовательно, можно найти концентрацию молекул каждого сорта.

Поскольку рассматривается состояние теплового равновесия, и средняя кинетическая энергия движения молекул каждого сорта одинакова (температура каждого компонента смеси одна и та же), то можно найти давление смеси газов и парциальное давление каждого ее компонента. Связь между ними и представляет собой закон Дальтона.

1. Газ в сосуде – идеальный, поэтому дальнодействие между молекулами отсутствует, и давление создается всеми структурными частицами газа:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \ldots + N_к;$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \ldots + N_к}{V};$$

$$p = nkT = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \ldots + N_к}{V} \cdot kT;$$

$$p = (n_1 + n_2 + n_3 + \ldots + n_к)kT.$$

2. Назовем парциальным давление, которое оказывают на стенки сосуда молекулы одного сорта, тогда при этой температуре:

$p_1 = n_1 kT; p_2 = n_2 kT; p_3 = n_3 kT; \ldots, p_к = n_к kT;$

Значит: $p = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots + p_к,$

давление смеси газов равно сумме парциальных давлений всех ее компонентов.

1. Давление газа в каждом сосуде:

$$\left.\begin{array}{l} p_1 = n_1 kT \\ p_2 = n_2 kT \\ \ldots \\ p_к = n_к kT \end{array}\right| \; p_1 = p_2 = \ldots = p_к \equiv p;$$

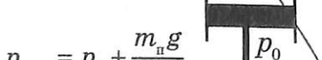
Следовательно, $n_1 = n_2 = \ldots = n_к \equiv n$.

2. Тогда число структурных частиц в каждом сосуде равно:

$$\left.\begin{array}{l} N_1 = n_1 V = nV \\ N_2 = n_2 V = nV \\ \ldots \\ N_к = n_к V = nV \end{array}\right| \; N_1 = N_2 = \ldots = N_к$$

В равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число структурных частиц.

p_0 – атмосферное давление



Так как столбик ртути в равновесии, значит давление газа справа и слева от него одинаково:

$$p_{газа} = p_0$$

Столбик ртути передает производимое на него газом в трубке давление в точки своей свободной поверхности. Атмосферное давление «удерживает» его и статическое давление ртути:

Сила давления газа в трубке, действующая на столбик ртути, компенсирует силу давления атмосферы, действующую на столбик ртути и его весовое давление.

$p_0 = p_{газа} + \rho gh$ (Па);

$p_0 = p_{газа} + h$ (мм рт.ст.).

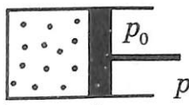
Отсюда:

$p_{газа} = p_0 - \rho gh$ (Па);

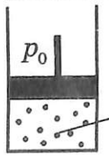
$p_{газа} = p_0 - h$ (мм рт.ст.).

$p_{газа} = p_0 + \rho gh$ (Па);

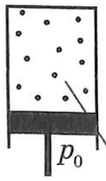
$p_{газа} = p_0 + h$ (мм рт.ст.).

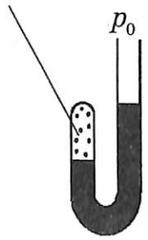


$p_{газа} = p_0$



$$p_{газа} = p_0 + \frac{m_п g}{S}$$





$$p_{газа} = p_0 - \frac{m_п g}{S}$$

Ситуация 2. Имеется несколько сосудов одинакового объема, заполненных разными газами. Сравнить число структурных частиц в каждом сосуде, если температура и давление газов одинаковы.

Ответ на поставленный вопрос получается просто, если записать основное уравнение МКТ для газа, находящегося в каждом сосуде, выразить из него концентрацию молекул и найти число частиц в каждом сосуде, зная его объем.

Часто удобно пользоваться следствием этого закона: различные газы, взятые в количестве 1 моль, при одинаковом давлении и температуре занимают одинаковые объемы. Например, при нормальных условиях моль любого газа занимает объем 22,4 л.

Ситуация 3. В стеклянной трубке цилиндрической формы, запаянной с одного конца, находится столбик ртути длиной h. Найдите давление воздуха в закрытой части трубки в трех ее положениях: горизонтальном и вертикальном, когда открытый конец трубки находится вверху и когда он внизу.

При рассмотрении этой ситуации нам не придется использовать газовые законы, так как в данном случае вопрос нахождения давления связан с определением давления (как физической величины), с учетом существования атмосферного давления и применением закона Паскаля.

Подобные ситуации часто встречаются при решении задач на газовые законы и иногда вызывают затруднения учащихся.

Поскольку в каждом из рассматриваемых случаев газ и столбик ртути находятся в равновесии, то при нахождении силы давления нужно пользоваться известными законами механики.

Наконец, в некоторых случаях при решении задач с подобными ситуациями полезно использовать внесистемную единицу измерения давления «мм рт.ст.».

Это позволяет просто «добавить» или «вычесть» из атмосферного давления, выраженного в таких же единицах, длину соответствующего столбика ртути, а не пересчитывать ее в паскали.

В тех случаях, когда в записи газовых законов давление входит сомножителем в обе части уравнения важно только то, чтобы оно было выражено в одних и тех же единицах.

Качественные задачи

Известен факт: $\rho_0 > \rho_н$.

Следовательно, $\frac{m_0}{V} > \frac{m_н}{V}$;

$$\frac{m_0 n_0}{V} > \frac{m_0 n_н}{V};$$

$$n_0 > n_н;$$

Следовательно, расстояния между частицами газа с высотой увеличиваются и газ становится ближе по свойствам к идеальному.

1. Давление идеального газа:

$$p = nkT;$$

$p \sim n$, так как $T = \text{const}, k = \text{const}$.

Следовательно, $n_2 = 2n_1$.

2. Концентрация – число частиц в единице объема.

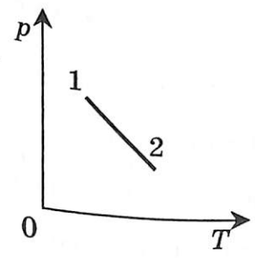
Плотность – масса частиц в единице объема, следовательно:

$$\rho_2 = m_0 n_2;$$

$$\rho_2 = m_0 \cdot 2n_1 = 2\rho_1.$$

Плотность газа в этом процессе увеличится в два раза.

Графические задачи



$m = \text{const}; M = \text{const}$.

1 состояние: p_1; V_1; T_1.

2 состояние: p_2; V_2; T_2.

Так как график процесса изображен в координатных осях (p,T), то давление и температура – явные параметры, а объем – неявный.

Задача 1. В каких слоях атмосферы воздух ближе к идеальному газу: у поверхности Земли или на больших высотах?

Для ответа на этот несложный вопрос нужно вычленить главный признак «идеальности» газа. Он состоит в том, что между частицами газа отсутствует молекулярное взаимодействие. Это требует, чтобы расстояния между частицами было велико по сравнению с размерами частиц.

Так как концентрация молекул газа уменьшается с высотой, то и средние расстояния между молекулами увеличиваются. Газ становится все «более идеальным».

Однако, чтобы быть «газом», нужно, чтобы число невзаимодействующих частиц в единице объема было значительным. Это условие накладывает ограничение сверху на высоту в нашем рассмотрении.

Задача 2. Давление некоторой массы идеального газа увеличили изотермически вдвое. Как при этом изменилась плотность газа?

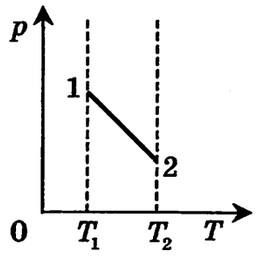
Рассуждения при решении подобных задач лучше всего проводить, прибегая к молекулярно-кинетическому истолкованию ситуации. И только потом подтверждать их расчетами.

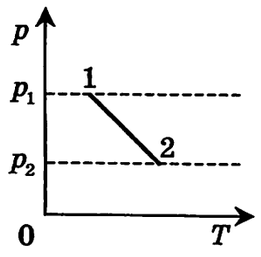
В нашем случае указание на изотермический процесс означает, что давление газа менялось только за счет изменения концентрации молекул. Она, как и давление, увеличилась вдвое. А так как число частиц в единице объема возросло вдвое, то и масса частиц в единице объема (то есть плотность) увеличилась в два раза.

Задача 3. На рисунке представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Как изменились (уменьшились или увеличились) в процессе значения макроскопических параметров газа, если известно, что масса газа оставалась постоянной.

При решении подобных задач нужно научиться безошибочно определять значения неявных термодинамических параметров. Для этого рассмотрим процедуру определения явных (то есть отмеченных по координатным осям) параметров состояния с позиций физики, а не математики.

Рассмотрим состояния 1и 2. Проведем изотермы (то есть линии постоянной темпе-

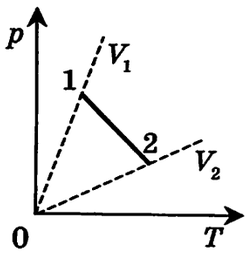


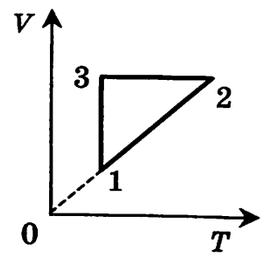


$T_2 > T_1$;

$p_2 < p_1$;

$V_2 > V_1$, так как угол наклона соответствующей ей изохоры к оси температур меньше, чем у первой.





$m = \text{const}; M = \text{const}.$

1 состояние: p_1, V_1, T_1;

2 состояние: p_2, V_2, T_2;

3 состояние: p_3, V_3, T_3.

1→2: $p_1 = p_2 = \text{const}$; так как график процесса лежит на прямой, выходящей из начала координат;

$T_2 > T_1$; $T \uparrow$, нагревание;

$V_2 > V_1$; $V \uparrow$, расширение;

изобарное нагревание (расширение).

2→3: $V_2 = V_3 = \text{const}$; так как график процесса лежит на прямой, перпендикулярной оси OV;

$T_3 < T_2$; $T \downarrow$, охлаждение;

$p_3 < p_2$; $p \downarrow$;

изохорное охлаждение.

3→1: $T_1 = T_3 = \text{const}$; так как график процесса лежит на прямой, перпендикулярной оси OT;

$V_1 < V_3$; $V \downarrow$, сжатие;

$p_1 > p_3$; $p \uparrow$;

изотермическое сжатие.

ратуры), через точки, соответствующие этим состояниям.

Так как температура в нашем случае явный параметр, то та изотерма, которая лежит правее по оси, отвечает большему значению температуры газа.

Аналогично, проводя изобары, получим возможность сравнить значения давления газа в этих состояниях.

Объем газа в нашем случае является неявным параметром. Однако, изохоры, соответствующие данным состояниям, провести нетрудно. Сравнивая объемы, занимаемые газом в изображенных нами изохорных процессах, получим ответ на вопрос задачи.

Задача 4. На рисунке изображен график циклического процесса, проведенного с постоянной массой идеального газа. Какие процессы составляют цикл? Как изменяются макроскопические параметры газа при переходе из одного состояния в другое? Напишите уравнения, описывающие каждый из процессов. Изобразите этот циклический процесс в других координатных осях.

Какие процессы составляют цикл?

Для ответа на этот вопрос нужно, во-первых, определить, какой макроскопический параметр остается постоянным в этом процессе. А во-вторых, указать, как изменялся какой-либо другой параметр (температура или объем). То есть дать полное название процесса, указав его направление.

Таким образом, параллельно мы отвечаем на второй вопрос задачи:

Как изменяются макроскопические параметры газа при переходе из одного состояния в другое?

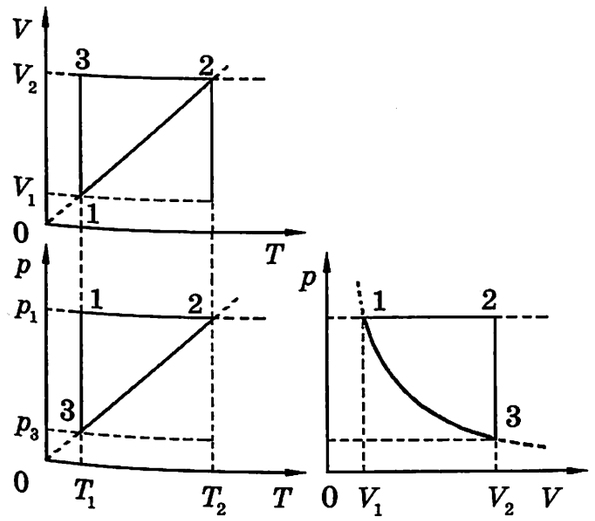
Ориентиром для определения названия процесса является вид его графика. Например, в нашем случае в координатных осях (V,T) процесс $1 \Rightarrow 2$ изобарный, так как его график лежит на прямой, выходящей из начала координат.

Для определения характера изменения макроскопических параметров в изопроцессе достаточно проследить, как меняются явные параметры, прослеживая изменение их значения непосредственно по координатным осям.

$1 \to 2: \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$; или $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$; или $\frac{V}{T} = \text{const}$.

$2 \to 3: \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$; или $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$; или $\frac{p}{T} = \text{const}$.

$3 \to 1: p_1 V_1 = p_2 V_2$; или $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$; или $pV = \text{const}$.



Напишите уравнения, описывающие каждый из процессов.

Уравнения, описывающие процессы, можно записать в любой удобной для вас форме. Проще всего это сделать, устанавливая связь между уже определенными параметрами, используя введенную систему обозначений.

Изобразите этот циклический процесс в других координатных осях.

Чтобы выполнить это задание, сначала нужно определить название «других координатных осей». В нашем случае в условии задачи были использованы оси (V,T), следовательно, можно выбрать две другие традиционно используемые пары осей: (p,V) и (p,T).

Поскольку масштаб на координатных осях, заданных в условии задачи не определен, то процессы можно изобразить лишь приблизительно. При этом последовательность процессов в цикле нужно сохранить обязательно.

В результате должен получиться циклический процесс, ведь газ в конце концов возвращается в исходное состояние с начальными значениями макроскопических параметров.

Образец выполнения этой части задачи показан в левом столбце.

Расчетные задачи

Задача 5. Баллон вместимостью 40 л содержит 1,98 кг углекислого газа. Баллон выдерживает давление не свыше 3 мПа. При какой температуре возникает опасность взрыва?

Дано:	*СИ:*	*Справочные:*
углекислый газ		CO_2
$m = 1{,}98$ кг		
$V = 40$ л	$4 \cdot 10^{-2}$ м^3	
$p_{max} = 3$ МПа	$3 \cdot 10^6$ Па	
T — ?		

Решение:

В данной задаче речь идет о расчете температуры такого состояния углекислого газа, при котором его давление превысит максимально допустимое значение.

Возникает вопрос: можно ли считать углекислый газ идеальным в данном конкретном случае? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним о границах применимости газовых законов (см. § 29).

В данном случае давление, при котором баллон взрывается примерно в 30 раз превышает атмосферное, а существенные отклонения газовые законы дают при давлениях в сотни раз больших атмосферного. Следовательно, можно приблизительно считать углекислый газ в нашей задаче идеальным газом.

Тогда запишем уравнение Менделеева-

1. Взрыв произойдет, когда давление газа в баллоне достигнет или превысит предельно допустимое: $p_г \geq p_{max}$.

2. Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$p_г V = \frac{m}{M} RT;$$

$$T = \frac{p_г VM}{mR};$$

$$T \geq \frac{p_{max} VM}{mR}.$$

3. Найдем молярную массу углекислого газа:

$$\frac{CO_2}{M_r = 1\cdot 12 + 2\cdot 16 = 44;}$$

$$M = M_r \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

4. Проверим наименование и выполним расчет:

$$[T] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^3\cdot\text{кг}\cdot\text{моль}\cdot\text{К}}{\text{м}^2\cdot\text{моль}\cdot\text{кг}\cdot\text{Дж}} = \text{К};$$

$$T \geq \frac{3\cdot 10^6 \cdot 4\cdot 10^{-2}\cdot 44\cdot 10^{-3}}{1{,}98\cdot 8{,}31} = 321(\text{к})$$

Ответ: взрыв баллона произойдет при нагревании баллона свыше 321К (или 48 °С).

Дано:	*СИ:*	*Справочные:*
водород		H_2
$V = 10$ л	10^{-2} м^3	$M_r = 2\cdot 1 = 2;$
$t_1° = 7°$C	280 К	
$p_1 = 50$ атм	$5\cdot 10^6$ Па	$M = 2\cdot 10^{-3}\ \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
$t_2° = 17°$C	290 К	
$p_2 = 50$ атм	$5\cdot 10^6$ Па	

Δm — ?

Решение:

1. Будем считать водород идеальным газом.

2. В начальном состоянии:

$$p_1V_1 = \frac{m_1}{M}RT_1; \quad m_1 = \frac{p_1V_1M}{RT_1}.$$

3. В конечном состоянии:

$$p_2V_2 = \frac{m_2}{M}RT_2; \quad m_2 = \frac{p_2V_2M}{RT_2}.$$

4. Пренебрегая изменением объема баллона при нагревании, считаем, что $V_1 = V_2$. Тогда получим:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{p_2V_2M}{RT_2} - \frac{p_1V_1M}{RT_2};$$

$$\Delta m = \frac{p_2V_2M}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right), \text{ так как } p_1 = p_2.$$

5. Выполним расчеты.

$$\Delta m = \frac{5\cdot 10^6\cdot 10^{-2}\cdot 2\cdot 10^{-3}}{8{,}31}\left(\frac{1}{290} - \frac{1}{280}\right) \approx$$

$$\approx -0{,}0015(\text{кг}).$$

Ответ: из баллона вытечет около 1,5 г водорода.

Клапейрона, так как именно оно определяет связь между всеми макроскопическими параметрами газа.

Выразим из уравнения температуру газа и подставим вместо давления газа предельно допустимое значение.

Для подсчета температуры нужно найти молярную массу углекислого газа. Для этого воспользуемся химической формулой этого вещества, периодической системой Менделеева (для определения относительной массы атомов) и формулой, позволяющей перейти от относительной массы молекулы к молярной массе.

Проверим наименование полученной формулы и выполним расчеты. При определении температуры полезно для ориентировки записывать ее значение также и в градусах Цельсия.

Задача 6. Манометр, соединенный с баллоном, в котором находится сжатый водород, при 7° С показывал 50 атм. Вследствие неисправного вентиля водород из баллона вытекает. Какая масса газа вытекла из баллона, если при температуре 17° С показания манометра не изменились?

При решении этой задачи сделаем следующие предположения. Первое: водород можно считать идеальным газом, так как его давление примерно в 50 раз больше атмосферного. Второе: будем считать, что изменение размеров баллона из-за теплового расширения пренебрежимо мало. Поэтому объем газа в баллоне остается постоянным.

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для двух состояний газа, о которых говорится в условии задачи.

Выразим из них массу газа в каждом случае, а затем найдем изменение массы.

Молярную массу водорода определим, пользуясь формулой связи с относительной массой молекулы водорода. А ее подсчитаем, воспользовавшись периодической системой Менделеева.

При подсчете изменения массы газа получаем отрицательное значение.

Знак «минус» показывает, что масса водорода в баллоне уменьшается, что соответствует условию, так как газ выходил из сосуда.

Столь малое изменение массы газа не должно вас удивлять, ведь в баллоне первоначально находилось около 430 г водорода. Проверьте это число сами.

Дано:	*СИ:*	*Справочные:*
водород		$M_1 = 2\cdot 10^{-3}$ кг/моль
$m_1 = 4$ г	$4\cdot 10^{-3}$ кг	
кислород		$M_2 = 32\cdot 10^{-3}$ кг/моль
$m_2 = 32$ г	$32\cdot 10^{-3}$ кг	
$t° = 7°$C	280 К	
$p = 700$ мм.рт.ст	$9{,}3\cdot 10^{-3}$ Па	

ρ — ?

Решение:

1. По определению плотности:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 + m_2}{V} = \rho_1 + \rho_2;$$

2. Из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p_1V = \nu_1RT = \frac{m_1}{M_1}RT; \qquad \rho_1 = \frac{m_1}{V} = \frac{p_1M_1}{RT};$$

$$p_2V = \nu_2RT = \frac{m_2}{M_2}RT; \qquad \rho_2 = \frac{m_2}{V} = \frac{p_2M_2}{RT};$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}; \qquad p_1 = p_2\cdot\frac{\nu_1}{\nu_2}$$

3. Отсюда для плотности смеси получим:

$$\rho = \frac{p_1M_1}{RT} + \frac{p_2M_2}{RT} = \frac{p_1M_1 + p_2M_2}{RT};$$

4. Парциальные давления найдем по закону Дальтона:

$$p = p_1 + p_2;$$

$$p = p_2\left(\frac{\nu_1}{\nu_2} + 1\right) = p_2\cdot\frac{\nu_1 + \nu_2}{\nu_2}$$

$$p_2 = p\cdot\frac{\nu_2}{\nu_1 + \nu_2}; \qquad p_2M_2 = p\cdot\frac{m_2}{\nu_1 + \nu_2}.$$

Аналогично:

$$p_1 = p\cdot\frac{\nu_1}{\nu_1 + \nu_2}; \qquad p_1M_1 = p\cdot\frac{m_1}{\nu_1 + \nu_2}.$$

5. Отсюда получим для плотности смеси:

$$\rho = \frac{p_1M_1 + p_2M_2}{RT} = \frac{p(m_1 + m_2)}{(\nu_1 + \nu_2)RT}.$$

6. Проверим наименование и проведем расчет:

$$[\rho] = \left[\frac{p(m_1 + m_2)}{(\nu_1 + \nu_2)RT}\right] = \frac{\text{Па}\cdot\text{кг}}{\text{моль}\cdot\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}} =$$

$$= \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{кг}}{\text{Н}\cdot\text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho = \frac{9{,}3\cdot 10^4\cdot 36\cdot 10^{-3}}{(2+1)\cdot 8{,}31\cdot 280} = 0{,}48\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right).$$

Ответ: плотность смеси равна 0,48 кг/м^3

Задача 7. Определите плотность смеси, состоящей из 4 г водорода и 32 г кислорода, при 7° С и давлении 700 мм. рт. ст.

Для определения плотности смеси воспользуемся определением плотности, а для определения массы газа — свойством аддитивности массы.

Тогда плотность смеси равна плотности ее компонентов, так как каждый компонент смеси находится в одном и том же объеме.

Выразим плотность каждого газа в смеси из уравнения Менделеева-Клапейрона. Тогда становится понятным, что для подсчета значения плотности каждого газа в смеси необходимо знать его парциальное давление.

Связь между парциальными давлениями и давлением смеси газа определяется законом Дальтона. Однако, для определения двух парциальных давлений одного уравнения Дальтона недостаточно.

Следовательно, необходимо иметь еще одно уравнение, связывающее неизвестные парциальные давления.

Такое уравнение можно получить, сравнивая уравнения Менделеева-Клапейрона, записанные для каждого газа.

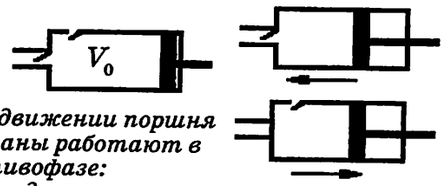
Для упрощения выражений в этом случае удобно воспользоваться понятием «количество вещества», заменив им, по определению, отношение массы каждого газа к его молярной массе.

Таким образом мы получаем два уравнения с двумя неизвестными: в одном нам известно значение суммы этих неизвестных (закон Дальтона), в другом — известно отношение этих же неизвестных.

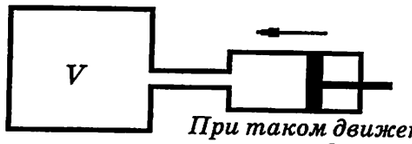
Решая систему уравнений, получим значения парциальных давлений кислорода и водорода, которые выражаются через давление смеси и отношение соотвествующего каждому газу количества вещества к сумме количеств вещества в смеси.

Умножая парциальное каждого газа на молярную массу этого газа и пользуясь определением количества вещества, получаем простые выражения, позволяющие найти окончательный результат.

Анализ полученного выражения показывает, что при заданных значениях давления и температуры плотность смеси зависит от соотношения массы и количества вещества в ней.



При движении поршня клапаны работают в противофазе: когда один открыт, другой закрыт.



При таком движении поршня воздух из камеры насоса вытесняется в сосуд.

Решение:

1 способ.

Каждое нагнетающее движение поршня насоса переводит в сосуд массу газа, равную m_1:

$$p_0V_0 = \frac{m_1}{M}RT; \qquad m_1 = \frac{p_0V_0M}{RT}.$$

За n качаний: $m_n = nm_1$, следовательно:

$$m_n = nm_1 = \frac{np_0V_0M}{RT};$$

давление, которое эта масса газа создаст в сосуде с объемом V, будет равно:

$$pV = \frac{m_n}{M}RT; \quad p = \frac{np_0V_0M}{VRT}\cdot\frac{RT}{M} = p_0\cdot\frac{nV_0}{V}.$$

Так как начальное давление в сосуде было равно p_0, то по закону Дальтона:

$$p_n = p_0 + p = p_0\left(\frac{nV_0}{V}+1\right).$$

2 способ.

Газ, находящийся в камере насоса, после нагнетающего движения поршня переходит в сосуд и заполняет его объем.

I состояние газа: p_0, V_0, T.

II состояние газа: p_1, V, T.

$$p_0V_0 = p_1V; \qquad p_1 = p_0\frac{V_0}{V}.$$

После n качаний сумма парциальных давлений создаст давление в сосуде:

$$p_n = p_0 + np_1 = p_0 + np_0\frac{V_0}{V} = p_0\left(1+n\frac{V_0}{V}\right).$$

Задача 8. В сосуд объемом V и начальным давлением p_0 при помощи нагнетающего насоса с рабочей камерой V_0 нагнетают воздух. Каким будет давление в сосуде после n качаний насоса? Атмосферное давление равно p_0. Процесс считать изотермическим.

Для того, чтобы решить эту задачу, важно четко представлять себе процесс нагнетания воздуха при помощи насоса, поэтому мы рекомендуем выполнить пояснительный рисунок.

У насоса имеется два клапана. Через один клапан в рабочую камера насоса поступает воздух из атмосферы. Поэтому в заполненной воздухом рабочей камере насоса давление воздуха равно атмосферному.

Через другой клапан воздух движением поршня вытесняется в сосуд. В идеальном насосе весь воздух целиком переходит из камеры насоса в накачиваемый сосуд.

Мы предлагаем два разных способа решения этой задачи.

Первый способ основан на свойстве аддитивности массы.

Действительно, после каждого накачивающего движения поршня масса воздуха в сосуде увеличивается на одно и то же число — массу воздуха, находящегося в рабочей камере насоса.

Значение этой массы можно подсчитать, пользуясь уравнением Менделеева-Клапейрона. Зная массу нагнетенного воздуха и объем сосуда, можно рассчитать давление, которое нагнетенный воздух создаст в сосуде. Добавляя его к первоначальному давлению газа в сосуде, найдем давление в нем после n качаний.

Второй способ основан на подсчете парциального давления одной порции воздуха, перемещаемой из рабочей камеры насоса в сосуд.

Рассматривая два состояния этого воздуха: сначала — в камере насоса, после — в сосуде, и учитывая, что происходящий с ним процесс изотермический, применяя уравнение Бойля-Мариотта, подсчитаем парциальное давление воздуха, переведенного в сосуд за один рабочий ход поршня.

Пользуясь законом Дальтона и учитывая, что начальное давление воздуха в сосуде было равно атмосферному, получим результат, совпадающий с полученным ранее другим способом.

Дано: | *СИ:* | *Справочные:*

водород
$m_1 = 2$г — $2\cdot10^{-3}$ кг
$M_1 = 2\cdot10^{-3}$ кг/моль

азот
$m_2 = 28$ г — $28\cdot10^{-3}$ кг
$M_2 = 28\cdot10^{-3}$ кг/моль

$V = 100$ л — 0,1 м^3

$T = 127^\circ$C — 400 К

p_I —? p_{II} —?

Решение:

1. Спустя много времени водород распределится по всему сосуду, его парциальное давление в обеих частях будет равно:

$$p_1V = \frac{m_1}{M_1}RT; \qquad p_1 = \frac{m_1}{VM_1}RT.$$

2. Азот будет находиться только в половине сосуда, поэтому его парциальное давление:

$$p_2\frac{V}{2} = \frac{m_2}{M_2}RT; \qquad p_2 = \frac{2m_2}{VM_2}RT.$$

3. По закону Дальтона:

$$p_I = \frac{m_1}{VM_1}RT; \qquad p_{II} = \frac{m_1}{VM_1}RT + \frac{2m_2}{VM_2}RT.$$

4. Проведем вычисления:

$$p_I = \frac{2\cdot10^{-3}\cdot8{,}31\cdot400}{2\cdot10^{-3}\cdot0{,}1} = 33\cdot10^3 \text{ (Па)};$$

$$p_{II} = 33\cdot10^3 + \frac{2\cdot28\cdot10^{-3}\cdot8{,}31\cdot400}{28\cdot10^{-3}\cdot0{,}1} = 99\cdot10^3 \text{ (Па)}.$$

Задача 9. Сосуд емкостью 100 л разделен пополам полупроницаемой перегородкой. В одну половину введено 2 г водорода а в другую 28 г азота. Перегородка может пропускать только водород. Определите давления, установившиеся по обе стороны перегородки, спустя большое время. Температура в обеих половинах одинакова и постоянна.

Поскольку перегородка не представляет преграды для молекул водорода, то спустя длительное время молекулы водорода распределятся по всему объему сосуда.

Давление, которое создаст водород, таким образом, будет одинаковым в обеих половинах сосуда.

Его можно рассчитать, пользуясь уравнением Менделеева-Клапейрона.

Молекулы азота не могут проникать в другую часть сосуда, так как для них перегородка непроницаема. Поэтому азот создает давление только во второй половине сосуда.

Давление азота также можно рассчитать по уравнению Менделеева-Клапейрона.

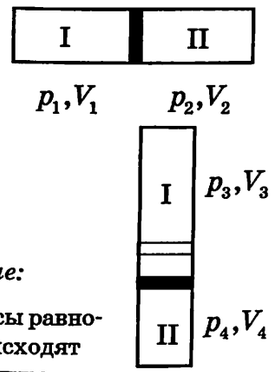
Результирующее давление во второй половине сосуда по закону Дальтона является суммой парциальных давлений водорода и азота.

Дано:

цилиндр с газом

а) горизонтальное
$p_1 = p_2 = p$; $V_1 = V_2$
поршень
m, S

б) вертикальное
p_3 –? p_4 – ?



Решение:

1. Будем считать процессы равновесными, тогда они происходят при постоянной температуре, равной температуре окружающей среды.

2. Рассмотрим газ в части I сосуда:

1-ое сост. — 2-ое сост.

$m_{газа} = \text{const}, M = \text{const}.$

$p_1 = p$ — p_3 –?

$V_1 = V$ — $V_3 = V + \Delta V$

T_1 = T_3

Задача 10. Цилиндрический сосуд разделен на две равные части поршнем с площадью сечения S и массой m. Когда цилиндр расположен горизонтально, его заполняют газом так, что давление газа в каждой половине равно p. Каким будет давление в каждой части цилиндра, когда его поставят вертикально?

Сначала изобразим рисунок, поясняющий ситуацию, описанную в задаче.

Поскольку газ находится в каждой части сосуда, и состояние и того, и другого газа изменяются, то всего получим два уравнения.

Первое описывает процесс с газом, находящимся в верхней части цилиндра, а второе — описывает процесс с газом, находящимся в нижней части цилиндра.

Выберем для каждого газа по два состояния. Первое — относится к горизонтальному положению цилиндра, второе —

$$p_1V_1 = p_3V_3;$$
$$pV = p_3(V + \Delta V).$$

3. Рассмотрим газ в части II сосуда:

1-ое сост. 2-ое сост.

$m_{\text{газа}} = \text{const}, M = \text{const}.$

$p_2 = p \qquad p_4 = p_3 + \dfrac{mg}{S} - ?$

$V_2 = V \qquad V_4 = V - \Delta V$

$T_2 = T_4$

$$p_2V_2 = p_4V_4;$$
$$pV = \left(p_3 + \frac{mg}{S}\right)(V - \Delta V);$$

4. Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} pV = p_3(V + \Delta V) \\ pV = \left(p_3 + \dfrac{mg}{S}\right)(V - \Delta V); \end{cases} \quad :V$$

$$\begin{cases} p = p_3 + p_3\dfrac{\Delta V}{V}; \\ p = \left(p_3 + \dfrac{mg}{S}\right)\left(1 - \dfrac{\Delta V}{V}\right) \end{cases}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{p - p_3}{p_3};$$

$$p = \left(p_3 + \frac{mg}{S}\right)\left(1 - \frac{p - p_3}{p_3}\right);$$

$$p_3^2 - p_3\left(p - \frac{mg}{S}\right) - \frac{mg}{2S}p = 0;$$

$$p_3 = \frac{1}{2}\left(p - \frac{mg}{S}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(p - \frac{mg}{S}\right)^2 + \frac{mg}{2S}p};$$

$$p_3 = \frac{1}{2}\left(p - \frac{mg}{S} + \sqrt{p^2 + \left(\frac{mg}{S}\right)^2}\right) > 0;$$

$$p_4 = \frac{1}{2}\left(p + \frac{mg}{S} + \sqrt{p^2 + \left(\frac{mg}{S}\right)^2}\right).$$

к вертикальному.

Чтобы не допустить ошибку, газу, находящемуся в верхней части цилиндра, припишем нечетные индексы (1 и 3 для начального и конечного состояний).

Тогда газу, находящемуся в нижней части цилиндра припишем четные индексы (2 для начального состояния и 4 для конечного).

Отметим, что в начальном состоянии оба газа имели одинаковое давление, равное p.

Теперь выразим давление газа, находящегося в нижней части сосуда, после того, как поршень перестал двигаться.

Поршень находится в равновесии. Следовательно, сила давления, которую оказывает на поршень газ, находящийся в нижней части сосуда, уравновешивает силу давления на поршень газа из верхней части сосуда и вес самого поршня.

Теперь определим объем каждого газа в начальном и последующем состоянии.

Объемы, которые занимали газы в начальном состоянии, одинаковы. А после поворота цилиндра объем газа в нижней части уменьшился на столько, на сколько увеличился объем газа в верхней части, так как суммарный (внутренний) объем цилиндра не изменился. Обозначим модуль изменения объема ΔV и запишем в общем виде, чему равны объемы каждого газа в конечном состоянии.

Наконец, процессы с газами происходят в атмосфере. Полагая, что эти процессы равновесные и атмосфера играет роль термостата, будем считать процессы изотермическими.

Тогда для каждого газа можно записать уравнение закона Бойля-Мариотта.

В результате получим систему уравнений, которая сводится делением обеих частей каждого уравнения на начальный объем газа V, к системе уравнений с двумя неизвестными: p_3 и $\Delta V/V$.

Выражая $\Delta V/V$ из первого уравнения и подставляя во второе, получим после несложных преобразований квадратное уравнение для p_3.

Решая его и отбрасывая отрицательный корень, так как давление газа не может быть отрицательным, получим выражение для давления газа, находящегося над поршнем.

Теперь остается получить значение давления газа под поршнем.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ	МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ	МЕХАНИЗМ ЯВЛЕНИЯ (ПРОЦЕССА)
1. Идеальный газ	1. Тепловое движение	1. Механизм броуновского движения 2. Механизм давления 3. Равновесный (обратимый) процесс

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ

1. Все тела состоят из частиц
2. Частицы совершают тепловое движение
3. Частицы взаимодействуют между собой силами электромагнитной природы

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОПЫТЫ

1. Броуновское движение
2. Опыты Перрена
3. Опыт Штерна

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МКТ

1. Рассматриваются только системы, состоящие из большого числа частиц, $N \sim 10^{23}$ и более
2. Температурный интервал, при котором молекулы и атомы можно считать неделимыми бесструктурными частицами:

для молекул $T \sim 1000 \ldots 3000$ К;
для атомов $T \sim 10000$ К

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

1. Одному и тому же макроскопическому состоянию системы отвечает огромное число микроскопических состояний
2. Среднее по времени значение квадрата модуля скорости движения любой произвольно выбранной частицы равно среднему значению квадрата скорости движения всех молекул газа в данный момент времени
3. Средний квадрат проекции скорости движения молекул на любое произвольно выбранное направление равен одной трети среднего квадрата скорости движения молекул

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ УСТАНАВЛИВАЕТ СВЯЗЬ МЕЖДУ МАКРОСКОПИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ГАЗА И МИКРОСКОПИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СТРУКТУРНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ДВИЖЕНИЯ И ПОЗВОЛЯЕТ УТОЧНИТЬ ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

МИКРО	МАКРО
масса структурной частицы	масса газа
диаметр частицы	объем газа
скорость частицы	давление газа
импульс частицы	температура газа
кинетическая энергия	плотность газа
	число частиц
	концентрация частиц

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Название процесса	Постоянный параметр	Переменные параметры	Уравнение		УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ
Изотермическое расширение сжатие	$m = \text{const}$ $M = \text{const}$ $T = \text{const}$	p, V $V\uparrow, p\downarrow$ $V\downarrow, p\uparrow$	$pV = \text{const};$	$p_1V_1 = p_2V_2$	$\dfrac{pV}{T} = \text{const}$
Изохорное нагревание охлаждение	$m = \text{const}$ $M = \text{const}$ $V = \text{const}$	p, T $T\uparrow, p\uparrow$ $T\downarrow, p\downarrow$	$\dfrac{p}{T} = \text{const};$	$\dfrac{p_1}{T_1} = \dfrac{p_2}{T_2}$	$\dfrac{p_1V_1}{T_1} = \dfrac{p_2V_2}{T_2}$
Изобарное нагревание охлаждение	$m = \text{const}$ $M = \text{const}$ $p = \text{const}$	V, T $T\uparrow, V\uparrow$ $T\downarrow, V\downarrow$	$\dfrac{V}{T} = \text{const};$	$\dfrac{V_1}{T_1} = \dfrac{V_2}{T_2}$	$\dfrac{pV}{T} = \dfrac{m}{M}RT$

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

До сих пор при изучении молекулярно-кинетической теории идеального газа мы фактически не рассматривали вопросы, связанные с превращениями энергии или законом сохранения энергии, хотя при изучении всех других явлений от механических и электромагнитных до явлений, происходящих в мире атомов, атомных ядер и элементарных частиц, энергия выступала в качестве важнейшей физической величины.

С позиций энергетического подхода мы могли не только описать любой процесс, но и предсказать, будут или нет происходить те или иные явления. Таким образом, мы установили, что закон сохранения энергии управляет всеми изученными нами явлениями природы и связывает их воедино. Он выполняется всегда: неизвестно ни одного случая его нарушения.

Фактически, в молекулярно-кинетической теории представление о кинетической энергии структурных частиц вещества позволило выяснить физический смысл абсолютной температуры, важнейшего макроскопического параметра, характеризующего тепловое состояние системы тел.

Рассмотрение процесса перехода системы тел в состояние теплового равновесия показало, что столкновения между молекулами приведенных в тепловой контакт тел приводят к тому, что средние кинетические энергии движения молекул уравниваются. Это означает, что и в тепловых процессах рассмотрение энергетических превращений играет важную роль.

Интересен следующий исторический факт: если в механике закон сохранения энергии был получен из законов Ньютона, то общий закон сохранения энергии, включающий все ее формы, является эмпирическим законом. И открыт он был в середине XIX века немецким ученым Р. Майером, английским ученым Д. Джоулем, и получил наиболее полную формулировку в трудах немецкого физика Г. Гельмгольца при изучении именно тепловых явлений.

При изучении процессов в газах, вы, наверное, обратили внимание на то, что в записи газовых законов фигурируют только макроскопические параметры. Следовательно, тепловые явления можно полностью описать при помощи этих величин, которые характеризуют всю систему в целом и которые могут быть измерены при помощи термометра, манометра, мерного сосуда и весов с разновесом (макроприборов).

Эти приборы не реагируют на воздействие отдельных молекул, а определяют некий совокупный эффект, производимый огромным числом частиц. Если отвлечься от молекулярного строения вещества, то описать тепловые явления можно только при помощи этих величин.

Такой подход к описанию тепловых явлений получил название **термодинамического**, а теория тепловых процессов, не учитывающая молекулярное строение тел, называется **термодинамикой**.

Термодинамика концентрирует внимание на закономерностях превращения энергии из одного вида в другой, добавляя к механическим формам энергии **внутреннюю**. Энергия определяет, какие физические и химические явления могут протекать в различных системах.

Термодинамика позволяет обнаружить новые, ранее неизвестные нам свойства веществ и тел, и установить связи между различными свойствами вещества.

Располагая экспериментальными данными о каких-то свойствах данного вещества, методами термодинамики можно рассчитать некоторые другие его свойства.

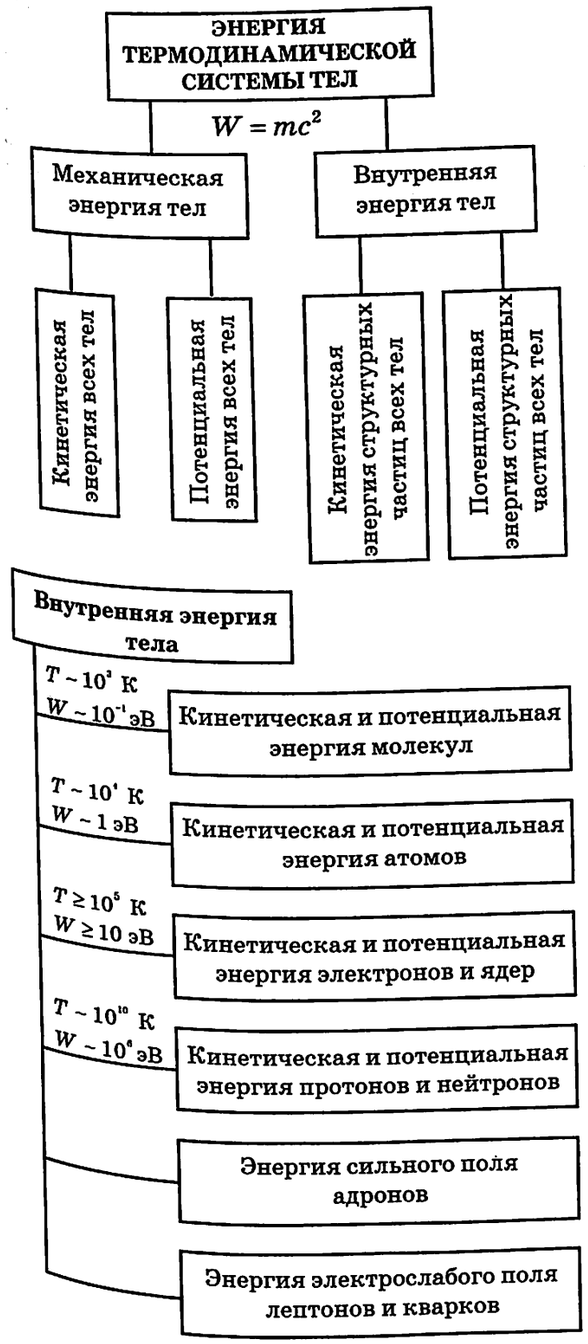
В дополнение к макроскопическим (термодинамическим) параметрам в термодинамике используется ряд важных понятий, которыми мы уже пользовались, но либо не акцентировали на них внимание, либо пользовались их синонимами.

Под **термодинамической системой** мы будем понимать совокупность тел любой физической природы и любого химического состава. Именно такая система и описывается термодинамическими параметрами (например, давлением, объемом, температурой и массой).

Состояние термодинамической системы однозначно характеризуется значениями термодинамических параметров.

Изменение состояния термодинамической системы называется термодинамическим процессом. Среди всех возможных процессов мы будем рассматривать только равновесные (обратимые) процессы.

§ 32. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА


ЭНЕРГИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛ
$W = mc^2$
Механическая энергия тел
Внутренняя энергия тел
Кинетическая энергия всех тел
Потенциальная энергия всех тел
Кинетическая энергия структурных частиц всех тел
Потенциальная энергия структурных частиц всех тел
Внутренняя энергия тела
$T \sim 10^3$ К
$W \sim 10^{-1}$ эВ
Кинетическая и потенциальная энергия молекул
$T \sim 10^4$ К
$W \sim 1$ эВ
Кинетическая и потенциальная энергия атомов
$T \geq 10^5$ К
$W \geq 10$ эВ
Кинетическая и потенциальная энергия электронов и ядер
$T \sim 10^{10}$ К
$W \sim 10^6$ эВ
Кинетическая и потенциальная энергия протонов и нейтронов
Энергия сильного поля адронов
Энергия электрослабого поля лептонов и кварков

Внутренняя энергия

1. *Обозначение: U;*
2. $[U]$ = Дж;

Из курса физики основной школы вам известно, что все макроскопические тела наряду с механической (потенциальной и кинетической) энергией обладают **внутренней энергией**, зависящей от внутреннего состояния тел.

Открытие именно внутренней энергии способствовало установлению закона сохранения энергии.

Внутренняя энергия обусловлена фактом дискретного строения вещества, наличием теплового движения частиц материи и их взаимодействием. Действительно, с точки зрения молекулярно-кинетической теории каждая структурная частица вещества обладает кинетической энергией, так как находится в постоянном движении, и потенциальной энергией, так как взаимодействует с другими частицами.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения структурных частиц идеального газа позволила уточнить физический смысл температуры.

Поскольку мы договорились рассматривать те интервалы температур, в которых молекулы и атомы не распадаются на составные части, то есть ведут себя как неделимые бесструктурные частицы, то **внутренняя энергия** такой термодинамической системы **представляет собой сумму кинетических и потенциальных энергий всех структурных частиц данной термодинамической системы.**

Если подниматься вверх по квантовой лестнице в область более высоких температур (энергий), то будем обнаруживать новые структурные частицы материи, которые также движутся и взаимодействую между собой. Соответствующие этим структурным частицам кинетические и потенциальные энергии (а также энергии созданных ими полей) тоже входят в состав внутренней энергии тела.

Таким образом, количество слагаемых, определяющих значение внутренней энергии, зависит от уровня проникновения вглубь вещества. Однако, слагаемые внутренней энергии, связанные со строением атомов, ядер и т.п. в изучаемых процессах не меняются, поэтому в термодинамике ограничиваются первыми двумя слагаемыми этой суммы: кинетической и потенциальной энергией атомов или молекул.

Внутренняя энергия

1. Физическая величина, характеризующая способность тела совершать работу и участвовать в теплообмене;

2. Способна превращаться в другие виды энергии в эквивалентных количествах;

3. Является функцией состояния термодинамической системы.

4. Однозначно определяется термодинамическими параметрами: температурой и объемом

$$U = U(T, V)$$

5. Одно и то же значение внутренней энергии могут иметь разные состояния данной термодинамической системы, то есть значение внутренней энергии не определяет однозначно состояние системы тел.

Внутренняя энергия
$U = U(T, V)$

- Кинетическая энергия структурных частиц $W_к = W_к(T)$
- Потенциальная энергия взаимодействия структурных частиц $W_п = W_п(V)$

Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{m_0 v_i^2}{2} = N\overline{W_к};$$

$$\overline{W_к} = \frac{3}{2}kT;$$

$$U = \frac{3}{2}kTN.$$

$$U = \frac{3}{2}kT \cdot \frac{m}{M}N_A = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT$$

Внутренняя энергия данной массы идеального газа однозначно определяется его абсолютной температурой.

Учитывая связь термодинамических параметров, получим удобную для расчета внутренней энергии идеального газа формулу:

$$pV = \frac{m}{M}RT;$$

$$U = \frac{3}{2}pV.$$

Внутренняя энергия, как и все другие виды энергии, **способна превращаться в другие виды энергии в эквивалентных количествах.**

Например, механическая энергия движущегося автомобиля полностью превращается во внутреннюю энергию при торможении. Этот факт можно обнаружить по изменению температуры трущихся поверхностей колес и дорожного покрытия.

При работе паровой турбины можно наблюдать обратный процесс: здесь внутренняя энергия пара частично превращается в механическую энергию вращения. (Частично, потому что отработанный пар все еще обладает внутренней энергией, хотя и заметно меньшей.)

Внутренняя энергия, как и другие виды энергии, является **функцией состояния** термодинамической системы. Значения термодинамических параметров — температуры и объема — однозначно определяют значение внутренней энергии данной системы тел.

Действительно, если обратиться к микроскопическому описанию тел, образующих термодинамическую систему, то средняя кинетическая энергия движения частиц однозначно определяется температурой.

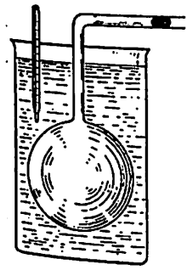
Среднее значение потенциальной энергии взаимодействия частиц зависит от расстояния между частицами, а оно, в свою очередь, определяется объемом тела.

Для простейшей модели вещества — идеального газа — значение внутренней энергии легко подсчитать, так как она определяется только абсолютной температурой газа.

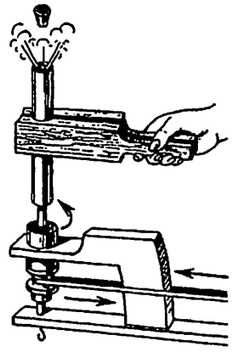
Температура определяет значение средней кинетической энергии частиц идеального газа. А так как взаимодействие между частицами идеального газа отсутствует, то и средняя потенциальная энергия взаимодействия частиц равна нулю. Поэтому единственное ненулевое слагаемое суммы, определяющей внутреннюю энергию идеального газа, — это сумма кинетических энергий всех частиц газа.

Наконец, также как и для других видов энергии, **одному и тому же значению внутренней энергии могут соответствовать разные состояния системы.** Это означает, что значение энергии не определяет состояние термодинамической системы однозначно.

§ 33. СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ. РАБОТА И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ В ТЕРМОДИНАМИКЕ



Изобарное расширение газа в колбе после погружения ее в стакан с горячей водой, которая выступает в роли нагревателя и является внешним телом по отношению к газу в колбе



Нагревание воздуха в гильзе, плотно закрытой пробкой, происходит в результате работы двигателя, приводящего гильзу в быстрое вращение, и из-за трения, преобразующей механическую энергию вращения во внутреннюю

Механическая работа

1. Обозначение: A;
2. $[A]$= Дж;
3. *Совершается, если на тело действует сила и происходит перемещение тела в пространстве;*
4. *Формула работы:*

$$A = F\,s\cos\alpha;$$

$$\alpha = \left(\widehat{\vec{F}\vec{s}}\right);\quad \vec{F} = \text{const};$$

5. *Характеризует процесс изменения состояния механической системы тел;*
6. *Равна изменению механической энергии системы тел:*

$$A_{\text{внешн}} = \Delta W.$$

Изучая газовые законы, мы рассматривали различные изопроцессы в газах.

При этом мы отмечали, что каждый процесс может протекать в двух разных «направлениях», которые мы характеризовали четырьмя словами: расширение, сжатие, нагревание и охлаждение.

Эти слова указывали на условия, выполнение которых определяло характер изменения термодинамических параметров, описывающих рассматриваемую систему.

Например, говоря о расширении или сжатии газа, мы подразумевали наличие внешнего воздействия, которое приводило к изменению его объема. Говоря о нагревании или охлаждении, мы имели в виду, что рассматриваемое тело приводили в контакт с нагревателем или холодильником, то есть подразумевали условия для протекания теплообмена между рассматриваемым газом и внешним по отношению к системе телом.

Таким образом, мы выделили два существенно различных вида воздействия на термодинамическую систему, которые приводят к изменению ее состояния, а значит, и к изменению ее внутренней энергии: первый из них — это совершение работы, второй — теплообмен. Рассмотрим особенности этих воздействий подробнее.

Физический термин «работа» вам хорошо известен из курса механики. Мы говорим о совершении работы, когда на тело действует сила, в результате чего тело совершает перемещение в пространстве. Совершение работы приводит к изменению механической энергии тела. Значение работы и соотвествующее значение изменения энергии можно вычислить по известным вам формулам.

В термодинамике, в отличие от механики, движение термодинамической системы в пространстве как целого не рассматривается.

Поэтому, говоря о работе в термодинамике, следует иметь в виду перемещение частей макроскопической системы относительно друг друга. В этом случае меняется объем данной системы, а ее скорость в выбранной системе отсчета не меняется и, чаще всего, принимается равной нулю.

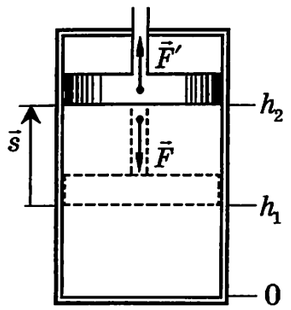
Конечно, в общем случае, изменение объема приводит к изменению температу-

Работа в термодинамике

1. Совершается при перемещении одних частей термодинамической системы относительно других, то есть при изменении объема системы.

2. Характеризует процесс изменения состояния термодинамической системы;

3. Приводит к изменению внутренней энергии термодинамической системы.



$p = \text{const}$;

S – площадь поперечного сечения цилиндра;

$F' = pS$;

$s = h_2 - h_1$;

$\vec{F}' \uparrow\uparrow \vec{s}$.

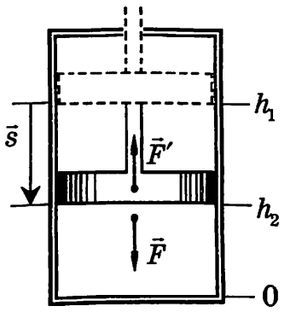
$A' \equiv A_{\text{газа}}$;

$A' = F' \cdot s \cdot \cos\alpha$; $\alpha = 0^0$, так как $\vec{F}' \uparrow\uparrow \vec{s}$;

$\cos\alpha = 1$.

$s = h_2 - h_1$;

$A' = pS(h_2 - h_1) = p(h_2 S - h_1 S) = p(V_2 - V_1)$.



$p = \text{const}$;

S – площадь поперечного сечения цилиндра;

$F' = pS$;

$s = h_2 - h_1$;

$\vec{F}' \downarrow\uparrow \vec{s}$.

$A' \equiv A_{\text{газа}}$;

$A' = F' \cdot s \cdot \cos\alpha$; $\alpha = 180^0$, так как $\vec{F}' \downarrow\uparrow \vec{s}$;

$\cos\alpha = -1$.

$s = |h_2 - h_1| = h_1 - h_2$;

$A' = -pS(h_1 - h_2) = p(h_2 S - h_1 S) = p(V_2 - V_1)$.

$A' = p\Delta V$;

Если $\Delta V > 0, V_2 > V_1$ – расширение газа, $A' > 0$;

Если $\Delta V < 0, V_2 < V_1$ – сжатие газа, $A' < 0$.

ры рассматриваемой системы. Действительно, чтобы, например, уменьшить объем газа, надо вдвигать поршень в цилиндр.

В этом случае молекулы при столкновениях с движущимся навстречу поршнем испытывают «дополнительный толчок», поэтому их скорость увеличивается. Если газ расширяется, то столкновение каждой молекулы с удаляющимся поршнем приводит к уменьшению ее скорости.

Таким образом, в термодинамике совершение работы также приводит к изменению состояния термодинамической системы, которое выражается в изменении объема и температуры, то есть сопровождается изменением внутренней энергии системы.

Для вычисления работы при изменении объема газа в термодинамике воспользуемся формулой работы. Но вспомним, что для ее применения нужно, чтобы в процессе совершения работы значение и направление силы, действующей на газ со стороны поршня, оставались неизменными. Поэтому рассмотрим изменение состояния газа в цилиндре при постоянном давлении, то есть изобарное сжатие или изобарное расширение газа.

Сначала рассчитаем работу газа, действующего на поршень силой F'. При изменении объема газ совершает работу, так как действует на поршень силой, под действием которой тот перемещается.

Если перемещение происходит медленно, то процесс можно считать равновесным и изобарным.

Простые преобразования позволяют установить, что при изобарном изменении объема газ совершает работу равную произведению давления на изменение объема. При этом знак работы определяется знаком изменения объема: при увеличении объема (расширение) газ совершает положительную работу, а при уменьшении (то есть, сжатии газа) — отрицательную.

Если воспользоваться третьим законом Ньютона, то в рассмотренных случаях поршень (то есть внешнее по отношению к газу тело) действует на него силой, равной по значению, но противоположной по направлению. Направление перемещения остается прежним. Поэтому работа, совершаемая внешними телами над газом, будет отличаться от работы газа только знаком.

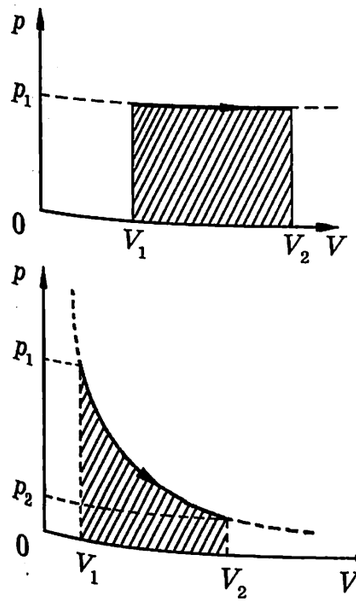
Это означает, что внешние тела совершают положительную работу, сжимая газ,

$\vec{F}' = -\vec{F}$ (по третьему закону Ньютона);

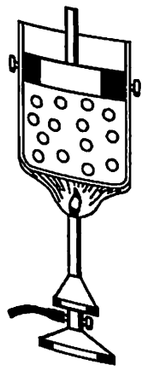
$A \equiv A_{\text{внешн}}$; $A = Fs\cos\beta$; $\beta = 180^0, \vec{F} \downarrow\uparrow \vec{s}$;

$\cos\beta = -1$;

$A = -pS(h_2 - h_1) = -p\Delta V$.



Работа газа численно равна площади фигуры, образованной графиком процесса в координатах p,V, двумя изохорами, проведенными через начальное и конечное состояния и осью OV.



Состояние газа в цилиндре с закрепленным поршнем изменяется в процессе теплопередачи, который происходит самопроизвольно, когда газ находится в тепловом контакте с нагревателем

Количество теплоты

1. Обозначение: Q;
2. $[Q]$ = Дж;
3. *Характеризует процесс изменения состояния термодинамической системы в процессе теплообмена, который происходит самопроизвольно без совершения работы;*
4. *Приводит к изменению внутренней энергии термодинамической системы.*

и отрицательную, когда «дают» газу расширяться.

Полученная формула для расчета работы газа в изобарном процессе может применяться при любых изменениях объема газа. В случае произвольного (неизобарного) процесса также можно пользоваться этой формулой, если изменение объема газа очень мало.

Это дает возможность получить простое геометрическое истолкование работы газа. Изобразим график изобарного процесса в координатах (p,V). Тогда работа газа в таком процессе численно равна площади прямоугольника, ограниченного графиком процесса, двумя изохорами, соответствующими начальному и конечному состоянию газа и координатной осью V.

В случае произвольного процесса можно разбить полное изменение объема на такие малые изменения, при которых давление газа меняется весьма незначительно, и подсчитать работу газа на каждом этапе. Пользуясь аддитивностью работы, получим: работа газа в произвольном процессе численно равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса в координатах (p,V), изохорами, соответствующими начальному и конечному состоянию газа и осью V.

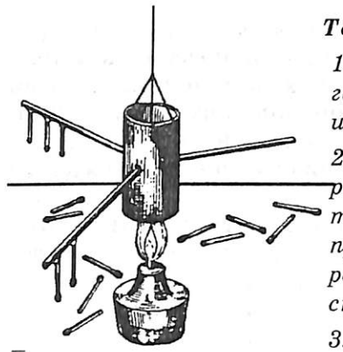
Рассмотрим теперь второй способ изменения состояния термодинамической системы, например, газа в цилиндре, связанный с протеканием теплообмена.

Как вы помните, теплообмен между двумя телами, имеющими разную температуру и приведенными в тепловой контакт, происходит самопроизвольно, то есть не требует «вмешательства» каких-либо других тел. Например, если привести газ в цилиндре с закрепленным поршнем (то есть фиксированным объемом, так что работа не совершается) в контакт с нагревателем (пламенем газовой горелки), то температура газа и его давление будут увеличиваться. То есть будет происходить изменение состояния газа и его внутренняя энергия будет изменяться.

В таких случаях говорят, что в процессе газу «было передано некоторое количество теплоты».

Количество теплоты — физическая величина, характеризующая изменение внутренней энергии тела, происходящее в процессах теплопередачи без совершения работы.

Виды теплопередачи



Теплопроводность:

1. Имеет место в газах, жидкостях и твердых телах;

2. При прочих равных условиях в твердых телах происходит быстрее, чем в жидкостях и газах;

3. Зависит от разности температур тел, приведенных в контакт.

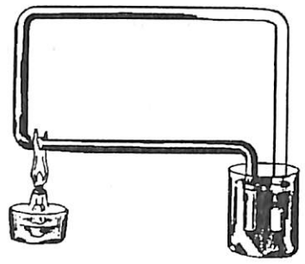
Конвекция:

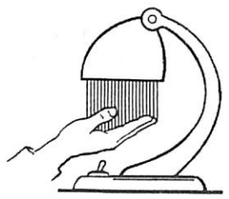
1. Происходит только в жидкостях и газах;

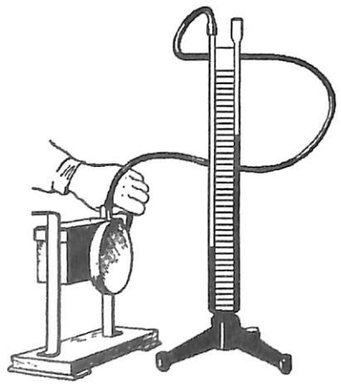
2. Тепло передается от более нагретого тела к менее нагретому при помощи струй газа или жидкости;

3. При прочих равных условиях в газах происходит быстрее, чем в жидкостях;

4. Зависит от разности температур тел, приведенных в контакт.







Излучение:

1. Имеет место в любых средах и вакууме;

2. Интенсивность излучения зависит от температуры тела, площади поверхности и цвета поверхности.

Молекулярно-кинетическая картина такого изменения внутренней энергии газа довольно ясна. Нагреватель имеет более высокую, чем у газа, температуру, поэтому средняя кинетическая энергия движения его молекул больше. При взаимодействии молекул нагревателя (пламени) с дном и стенками цилиндра происходит увеличение средней кинетической энергии движения молекул цилиндра, а при их взаимодействии с молекулами газа — увеличение средней кинетической энергии молекул газа. (В этом смысле нагревателем для газа являются дно и стенки цилиндра.) Температура цилиндра и газа в нем увеличиваются, а температура нагревателя (пламени) уменьшается.

При изучении тепловых явлений в курсе физики основной школы мы рассматривали подробно три принципиально различных процесса теплопередачи: теплопроводность, конвекцию и излучение.

Механизм этих процессов различен, но в любом случае он приводит к изменению внутренней энергии тела, приведенного в тепловой контакт с нагревателем или холодильником. Именно наличие разных видов теплопередачи позволяет уточнить термин «тепловой контакт». Тепловой контакт при теплопроводности и конвекции предполагает соприкосновение (или собственно контакт) поверхностей двух тел.

При теплопередаче путем излучения непосредственного соприкосновения не нужно, тела могут находиться на значительных расстояниях и разделены «безвоздушным пространством», а тепловой контакт между ними существует. Этот контакт обеспечивает электромагнитное излучение, которое испускают все тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля.

В курсе физики основной школы мы также получили формулы для расчета количества теплоты в процессах нагревания (охлаждения) тела, а также при агрегатных превращениях тел. Поскольку пока мы ограничиваем свое рассмотрение идеальным газом, то для нас будет представлять интерес формула для расчета количества теплоты при нагревании и охлаждении тела.

Калориметрические опыты показали, что в процессе нагревания вещество обнаруживает особое свойство, которое количественно характеризуется величиной, получившей название **удельной теплоемкости**. Удельная теплоемкость вещества показывает, какое количество теплоты нужно передать 1 кг данного вещества, чтобы изменить его температуру на 1 К.

При нагревании и охлаждении тела:

$$Q = cm\Delta T = cm\Delta t^{\circ},$$

c – удельная теплоемкость вещества;

m – масса тела;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – изменение температуры тела.

$Q > 0$, если $\Delta T > 0$, тело нагревается;

$Q < 0$, если $\Delta T < 0$, тело охлаждается.

Удельная теплоемкость вещества

1. Обозначение: c;

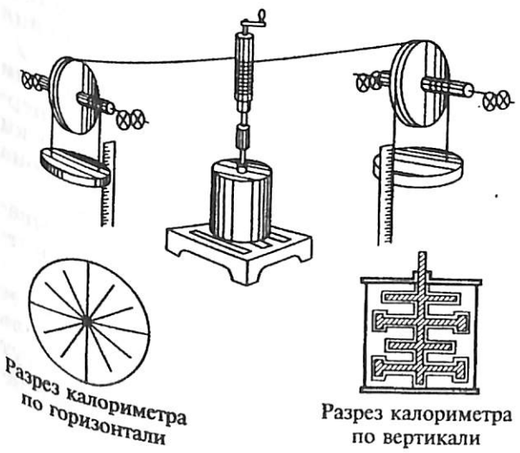
2. [c]= Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$;

3. Характеристика тепловых свойств вещества;

4. Численно равна количеству теплоты, которое необходимо передать 1 кг данного вещества, чтобы увеличить его температуру на 1К.

Д. Джоуль
1818 — 1889

Схема установки Д. Джоуля для установления механического эквивалента теплоты.



Разрез калориметра по горизонтали

Разрез калориметра по вертикали

Так как любое тело состоит из какого-то конкретного вещества, то для нагревания этого тела на 1 К также потребуется вполне определенное количество теплоты.

Это свойство тела получило название **теплоемкости**. Теплоемкость тела равна произведению массы этого тела на удельную теплоемкость вещества, из которого оно состоит. В случае, если тело содержит 1 моль вещества, говорят о **молярной теплоемкости** вещества.

Количество теплоты, выступая в роли величины, характеризующей изменение внутренней энергии тела, измеряется в тех же единицах, что и энергия и работа. Установление этого факта сыграло в развитии термодинамики важную роль: экспериментально было доказано, что при теплообмене не сохраняется энергия, а не особое вещество — теплород.

Первые точные опыты, доказывающие эквивалентность переданного телу количества теплоты и работы, были выполнены в середине XIX века английским физиком Д. Джоулем.

Джоуль провел много разных экспериментов. В одном из них он измерял увеличение температуры ртути в калориметре при вращении лопастей, которые приводились в движение опускающимися грузами. В начале и конце опыта лопасти и грузы находились в покое, поэтому их кинетическая энергия за время опыта не менялась. Работа совершалась за счет изменения потенциальной энергии грузов.

Рассчитывая эту работу и измеряя изменение температуры при трении лопастей о ртуть, Джоуль пришел к выводу, что каждые 4,2 Дж работы приводят к такому изменению температуры тела, что и передача ему количества теплоты, равного 1 калории. (1 калория — это количество теплоты, которое нужно сообщить 1 г воды, чтобы увеличить ее температуру на 1 К.)

Многочисленные, проведенные с завидной точностью, опыты Джоуля, а также опыты других ученых подтвердили этот вывод. Таким образом, экспериментально было установлено, что калория — ни что иное, как тепловая единица энергии.

Величина 4,2 Дж/кал с тех пор получила название механического эквивалента теплоты.

§ 34. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Р. Майер
1814 — 1878

Г. Гельмгольц
1821 — 1894

Закон сохранения механической энергии

1. Выполняется только для консервативной системы частиц (то есть замкнутой системы, в которой отсутствуют диссипативные силы — силы трения, сопротивления);

2. Рассматриваются взаимные превращения двух видов механической энергии — кинетической и потенциальной;

3. Разные математические формы записи закона:

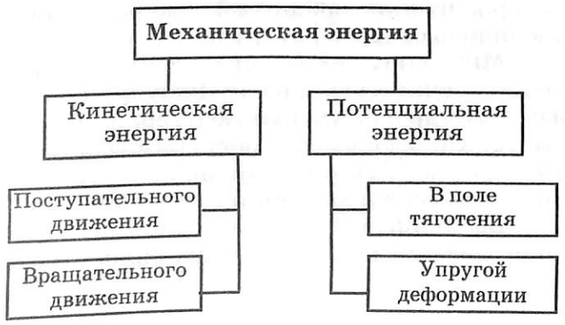
$$W = \text{const};$$

$$W_к + W_п = \text{const};$$

$$\Delta W_к + \Delta W_п = 0;$$

$$\Delta W_к = -\Delta W_п;$$

$$W_{к1} + W_{п1} = W_{к2} + W_{п2};$$



На основании опытов Д. Джоуля и огромного числа других наблюдений, путем обобщения опытных фактов был сформулирован важнейший из фундаментальных законов сохранения — закон сохранения энергии.

Открытие этого закона связано с именем немецкого ученого Р. Майера, а наиболее полную формулировку закон сохранения энергии получил в трудах немецкого физика Г. Гельмгольца.

Суть этого закона сводится к утверждению, что энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно. Она только переходит из одной формы в другую.

Чтобы успешно пользоваться этим законом, нужно уметь в выбранной системе тел распознавать разные формы энергии. Знать от каких величин, характеризующих состояние выбранной системы, каждая форма энергии зависит, и как ее можно подсчитать. В этом случае закон сохранения энергии можно записать математически.

Так в механике, если между телами не действуют силы трения или силы сопротивления, то полная механическая энергия этой замкнутой системы тел сохраняется. Если же на эту систему действуют внешние тела, то изменение энергии этой системы равно работе внешних сил. В зависимости от знака работы энергия системы может увеличиваться или уменьшаться.

После того, как было установлено, что любое тело обладает еще и внутренней энергией, и что ее изменение может происходить не только при совершении работы, но и в процессах теплопередачи, оказалось возможным обощение закона сохранения энергии с учетом внутренней энергии.

Первый закон термодинамики, или как его называли первооткрыватели — первое начало термодинамики, математически выражает количественную сторону закона сохранения и превращения энергии.

Полной энергией системы тел называется сумма полной механической и внутренней энергии тел данной системы.

Если данная система замкнута, то ее полная энергия остается постоянной сколь угодно долго, хотя внутри системы могут происходить превращения энергии из одних видов в другие.

В замкнутой системе тел полная энергия сохраняется:

$$W + U = \text{const};$$

$$W_1 + U_1 = W_2 + U_2;$$

$$\Delta(W + U) = 0;$$

$$\Delta W = -\Delta U;$$

$$W_2 - W_1 = -(U_2 - U_1).$$

В незамкнутой системе тел изменение полной энергии равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, которым система обменивается с окружающими телами:

$$\Delta(W + U) = A_{внешн} + Q_{внешн}.$$

Первый закон термодинамики:

$$\Delta U = A_{внешн} + Q_{внешн};$$

$$A_{внешн} = -A';$$

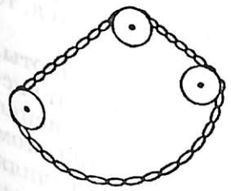
$$\Delta U = -A' + Q_{внешн};$$

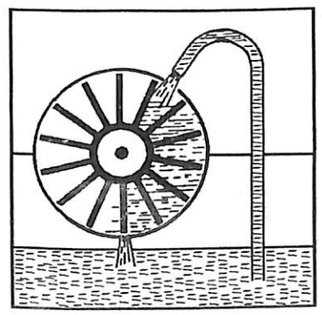
$$Q_{внешн} = \Delta U + A'.$$

Количество теплоты, полученное системой или отданное ею внешним телам в процессе теплопередачи — $Q_{внешн}$

Изменение внутренней энергии системы — ΔU

Работа, совершенная системой — A'





Если данная система незамкнута, то изменение ее полной энергии связано с совершением работы внешними силами над этой системой и процессами теплообмена между этой системой и внешними телами.

Обычно в теории тепловых процессов рассматривают тела и системы тел, положение центра масс которых в данных явлениях практически не меняется, поэтому механическая энергия остается постоянной. Тогда первый закон термодинамики можно сформулировать следующим образом: **изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе. Это изменение энергии не зависит от способа, которым этот переход осуществляется.**

Первый закон термодинамики связывает изменение внутренней энергии с изменением макроскопических параметров системы — объема и температуры, так как работа и количество теплоты выражаются именно через эти параметры.

Часто работу внешних сил выражают через работу самой системы. Мы уже показали, что обе работы имеют одинаковые значения и противоположные знаки. Поэтому заменяя в записи первого закона термодинамики работу внешних сил на работу самой системы и перенося ее в другую часть равенства, получим удобную и наиболее употребимую форму записи первого начала.

Суть ее сводится к утверждению, что количество теплоты, переданное системе «расходуется» на изменение ее внутренней энергии и совершение этой системой работы.

Первый закон термодинамики позволил обосновать принципиальную невозможность построения вечного двигателя первого рода, то есть устройства, которое могло бы без затрат топлива (в общем случае — энергии) совершать сколь угодно большую работу или совершать работу сколь угодно долго.

Проектов таких двигателей было создано огромное число, многие из них были довольно остроумны и не всегда сразу можно было сказать, что же конкретно мешает работать предлагаемым устройствам. Но у всех них — одно общее свойство: они не действуют вечно. Поясним это.

Согласно первому закону термодинамики работа, которую может совершить данная система при отсутствии притока тепла извне, равна изменению внутренней

Изотермические процессы:

$m = \text{const}; \quad M = \text{const};$
$T = \text{const}; \quad \Delta T = 0.$

$$Q = \Delta U + A';$$
$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT;$$
$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T = 0;$$
$$Q = A'.$$
$$A' \sim \Delta V.$$

Изотермическое расширение:

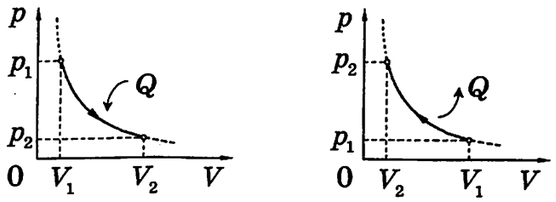
$V_2 > V_1; \Delta V > 0; A' > 0;$

следовательно, $Q = A' > 0,$
необходим приток тепла в систему.

Изотермическое сжатие:

$V_2 < V_1; \Delta V < 0; A' < 0;$

следовательно, $Q = A' < 0,$
необходим отток тепла из системы.



Изохорные процессы:

$m = \text{const}; \quad M = \text{const};$
$V = \text{const}; \quad \Delta V = 0.$

$$Q = \Delta U + A';$$
$$A' \sim \Delta V, A' = 0$$
$$Q = \Delta U.$$
$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T.$$

Изохорное нагревание:

$T_2 > T_1; \quad \Delta T > 0; \quad \Delta U > 0;$

следовательно, $Q = \Delta U > 0,$
необходим приток тепла в систему.

Изохорное охлаждение:

$T_2 < T_1; \quad \Delta T < 0; \quad \Delta U < 0;$

следовательно, $Q = \Delta U < 0,$
необходим отток тепла из системы.

энергии, взятой с противоположным знаком. Иначе говоря, работу в этом случае система может совершать только за счет собственной внутренней энергии.

После того как запас энергии будет исчерпан, двигатель перестанет работать.

Применим первый закон термодинамики к описанию различных изопроцессов с идеальным газом.

Начнем с рассмотрения процессов, в которых температура газа остается постоянной — **изотермического расширения и изотермического сжатия.**

Поскольку внутренняя энергия данной массы идеального газа зависит только от его температуры, а температура в изотермических процессах остается постоянной, то изменение внутренней энергии при изотермическом сжатии и расширении равно нулю. Следовательно, количество теплоты, переданное системе целиком расходуется на совершение работы газом.

Отсюда ясно, чтобы осуществить изотермическое расширение, нужно привести газ в контакт с нагревателем, который будет поддерживать постоянной температуру расширяющегося газа.

Точно также, чтобы осуществить изотермическое сжатие, необходимо обеспечить постоянный отток тепла от газа. Для этого необходимо привести газ в контакт с холодильником.

На графиках процессов это можно показать так, как показано на рисунках.

Рассмотрим теперь изохорные процессы, то есть процессы при постоянном объеме газа: **изохорное нагревание и изохорное охлаждение.**

Поскольку объем газа не меняется, то газ работу не совершает.

Следовательно, количество теплоты, переданное системе или отведенное от системы целиком расходуется на изменение внутренней энергии этого газа. При этом при подводе тепла в систему, ее внутренняя энергия возрастает пропорционально изменению температуры. А в случае, когда система отдает тепло окружающим телам, ее внутренняя энергия уменьшается вместе с уменьшением температуры.

Очевидно, что для проведения такого процесса необходимо иметь герметически закрытый сосуд, который следует привести в контакт с нагревателем, чтобы провести изохорное нагревание.

Чтобы провести изохорное охлаждение, нужно привести систему в контакт с холодильником.

Если $\nu = 1$, то из $Q = \Delta U$ получим:

$$Q = C_V \Delta T; \qquad \Delta U = \frac{3}{2}R\Delta T;$$
$$C_V \Delta T = \frac{3}{2}R\Delta T; \qquad C_V = \frac{3}{2}R.$$

Изобарные процессы:

$m = \text{const}; \quad M = \text{const};$
$p = \text{const}.$

$$Q = \Delta U + A';$$
$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T;$$
$$A' = p\Delta V.$$
$$Q = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T + p\Delta V.$$

Изобарное нагревание (расширение):

$T_2 > T_1; \quad \Delta T > 0; \quad \Delta U > 0;$
$V_2 > V_1; \quad \Delta V > 0; \quad A' > 0;$

следовательно, $Q = \Delta U + A' > 0,$
необходим приток тепла в систему.

Изобарное сжатие:

$T_2 < T_1; \quad \Delta T < 0; \quad \Delta U < 0;$
$V_2 < V_1; \quad \Delta V < 0; \quad A' < 0;$

следовательно, $Q = \Delta U + A' < 0,$
необходим отток тепла из системы.

$\nu = 1; \quad pV = RT; \quad p\Delta V = R\Delta T;$
$Q = C_p \Delta T;$

$$\Delta U + A' = \frac{3}{2}RT + RT = \frac{5}{2}RT;$$
$$C_p = \frac{5}{2}R = C_V + R.$$

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} \to \infty$$

$$Q = \underbrace{\Delta U}_{\text{в изотермическом процессе}} + \underbrace{A'}_{\text{в изохорном процессе}}$$

ние, нужно привести систему в контакт с холодильником.

Если записать уравнение первого закона термодинамики для этого процесса, полагая, что в сосуде находится 1 моль идеального газа, можно подсчитать молярную теплоемкость идеального газа при постоянном объеме. Она одинакова для для всех одноатомных газов и равна $3R/2$.

При рассмотрении изобарных процессов — изобарного нагревания (или расширения) и изобарного охлаждения (или сжатия) — обнаружим, что и внутренняя энергия газа изменяется, и газ совершает работу.

Выражая работу идеального газа в изобарных процессах по формуле через изменение объема и учитывая, что связь между объемом газа, его давлением и температурой выражает уравнение Менделеева-Клапейрона, выразим работу газа через изменение его температуры.

Тогда можно найти выражение для количества теплоты, которое нужно передать данной массе идеального газа, чтобы провести изобарное нагревание.

Записывая это выражение для одного моля, можно найти значение молярной теплоемкости газа при постоянном давлении.

Обратите внимание, что молярная теплоемкость газа оказывается зависящей от того, какой процесс с ним проводится. Этот важный вывод нам позволил сделать первый закон термодинамики.

В таком случае правомерно задать вопрос о молярной теплоемкости идеального газа в изотермическом процессе. Если подойти к ответу с позиции сказанного выше о том, как следует проводить изотермическое расширение, то получается следующее. Постоянный приток тепла к газу в этом процессе не приводит к изменению его температуры, следовательно, в этом процессе теплоемкость газа огромна.

Если воспользоваться формальным определением теплоемкости, то деление количества теплоты на изменение температуры, равное нулю, дает результат: теплоемкость идеального газа в изотермическом процессе неограниченно велика.

Мы рассмотрели все изопроцессы с позиций первого закона термодинамики и вы, возможно, обратили внимание на такой факт. В записи закона фигурируют три величины: количество теплоты, изменение внутренней энергии и работа газа. Две последние величины в некоторых процессах

Адиабатные процессы:

$$Q = 0;$$

$$\Delta U + A' = 0;$$

$$\Delta U = -A'.$$

Если происходит адиабатное расширение:

$V_2 > V_1$; $\Delta V > 0$; $A' \sim \Delta V$; $A' > 0$.

$\Delta U = -A' < 0$.

$\Delta U \sim \Delta T$; $\Delta T < 0$; $T_2 < T_1$,

температура газа уменьшается.

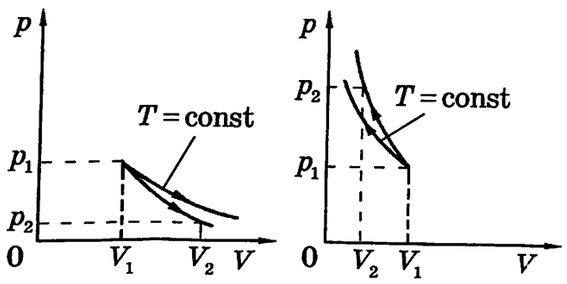
Если происходит адиабатное сжатие:

$V_2 < V_1$; $\Delta V < 0$; $A' \sim \Delta V$; $A' < 0$.

$\Delta U = -A' > 0$.

$\Delta U \sim \Delta T$; $\Delta T > 0$; $T_2 > T_1$,

температура газа увеличивается.



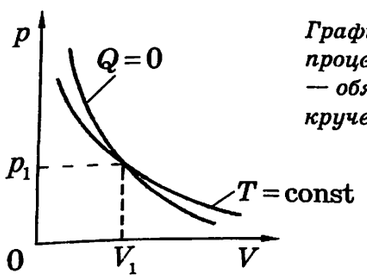


График адиабатного процесса — адиабата — обязательно идет круче изотермы

Адиабатный процесс

1. Процесс, в котором отсутствует теплообмен системы с окружающими телами, $Q = 0$;

2. Возможен либо в теплоизолированной системе, либо очень быстрый процесс;

3. В процессе изменяются все термодинамические параметры: давление, объем и температура;

4. Газ совершает работу за счет собственной внутренней энергии.

обращались в ноль: изменение внутренней энергии равно нулю в изотермических процессах, а работа газа равна нулю в изохорных. Возможен ли процесс в котором в ноль обращается количество теплоты?

Порассуждаем. Количество теплоты — величина, характеризующая процесс теплообмена. Теплообмен между двумя телами, имеющими разные температуры, происходит самопроизвольно. Конечно, никакая реальная «оболочка» не может предотвратить теплообмен, но сделать его чрезвычайно слабым может. С такой «оболочкой» вы имеете дело, когда пользуетесь термосом: в его колбе воздух между двойными стенками откачан и сами стенки сделаны зеркальными.

Можно пойти и другим путем. Теплообмен — процесс довольно медленный, ведь энергия в нем передается через механизм взаимодействия разных молекул. Поэтому если провести процесс с газом очень быстро, теплообмен между ним и окружающими телами произойти просто не успевает.

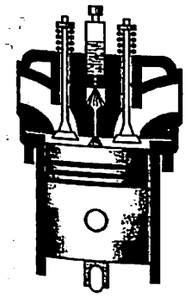
Таким образом, процесс, в котором отсутствует теплообмен системы с окружающими телами, возможен. Он получил название **«адиабатный процесс»**.

В адиабатном процессе газ, расширяясь, совершает положительную работу за счет собственной внутренней энергии. Но это означает, что температура газа в таком процессе уменьшается.

Напротив, если газ адиабатно сжимается, то есть совершает отрицательную работу, то в соответствии с первым законом термодинамики, его внутренняя энергия возрастает, следовательно, увеличивается и температура газа.

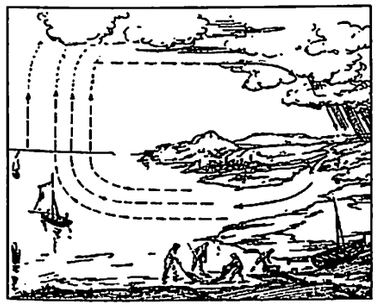
Именно поэтому, если изобразить графически адиабатное расширение газа и адиабатное сжатие, и сравнить ход графика с графиком изотермического процесса, то обнаружим, что адиабата «идет круче» изотермы. Это происходит потому, что каждое следующее состояние идеального газа при адиабатном расширении имеет более низкую температуру, чем предыдущее. А состояниям с меньшими температурами отвечает область, лежащая под изотермой, соответствующей температуре начального состояния. При адиабатном сжатии наоборот: адиабата поднимается в область более высоких температур, чем начальная.

Адиабатные процессы широко распространены в природе и в технике (в частности, при работе тепловых двигателей).



В двигателях Дизеля адиабатное сжатие воздуха приводит к такому повышению его температуры, что горючее, которое впрыскивается в рабочую камеру при помощи форсунки, воспламеняется без специального электроподжига.

В атмосфере Земли охлаждение газов при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах. Это обеспечивает круговорот воды в природе



$Q_{внешн} = 0$; $A' = 0$; $\Delta U = 0$;

$\Delta U = U_2 - U_1 = 0$; $U_2 = U_1 = \text{const}$.

Пусть система состоит из i тел, имеющих разные температуры. Тогда:

$Q_1 = \Delta U_1$; $Q_2 = \Delta U_2$; ...; $Q_i = \Delta U_i$.

$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_i = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \ldots + \Delta U_i = 0$;

$$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_i = 0.$$

Среди явлений природы, в которых важную роль играют адиабатные процессы назовем процесс распространения звуковых волн в воздухе, а также атмосферные процессы, связанные с круговоротом воды в природе. Нагретый воздух, содержащий водяные пары поднимается от поверхности Земли и быстро расширяется, так как атмосферное давление быстро уменьшается с высотой. Адиабатно расширяясь, он охлаждается, в результате чего водяные пары конденсируются и образуются облака.

Наконец, возможен процесс, в котором система и не обменивается теплом с окружающими телами, и не совершает работы. В этом случае внутренняя энергия системы не меняется.

Это не означает, что внутри самой системы никаких процессов не происходит. Если в начальный момент времени тела, составляющие такую систему, имели разные температуры, идет процесс установления теплового равновесия. Тела системы обмениваются между собой некоторыми количествами теплоты, так что в сумма всех количеств теплоты равна нулю.

Это уравнение носит название уравнения теплового баланса. Оно было открыто как результат обобщения экспериментальных данных в калориметрических опытах. Теперь же мы получили его как следствие первого закона термодинамики.

§ 35. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Алгоритм решения задач на применение первого закона термодинамики

1. Уясните, какие тела составляют термодинамическую систему.

2. Выясните, является ли эта система замкнутой (изолированной) или нет.

3. Установите, как изменяются термодинамические параметры (температура и объем) в данном процессе и сделайте вывод относительно того, совершается ли в этом процессе работа и изменяется ли внутренняя энергия.

4. Запишите первый закон термодинамики и сделайте вывод относительно количества теплоты, которое поступает в систему или отдается ею внешним телам.

5. Используйте газовые законы для подсчета значений термодинамических параметров.

При решении задач на применение первого закона термодинамики мы будем использовать преимущественно известные вам приемы. Поскольку в этих задачах речь пойдет о процессах, проводимых с идеальным газом, то будем использовать алгоритм решения задач на применение газовых законов, уравнения Менделеева-Клапейрона и уравнения состояния идеального газа для подсчета значений термодинамических параметров.

Мы решим также несколько задач на использование уравнения теплового баланса. Однако, как говорилось ранее, мы не будем пока рассматривать агрегатные превращения вещества, так как вопрос о реальных газах, жидкостях и твердых телах рассмотрим в последней главе курса.

Качественные задачи

Решение:

а) $$U_1 = \sum_i^{N_1} \left(W_{i,\text{к}} + W_{i,\text{п}}\right);$$

$$U_2 = \sum_i^{N_2} \left(W_{i,\text{к}} + W_{i,\text{п}}\right);$$

$N_2 < N_1$; следовательно, число положительных слагаемых в сумме стало меньше, следовательно:

$$U_2 < U_1.$$

б) $$\overline{W_\text{к}} = \frac{3}{2}kT;$$

1. Допустим, что распределение молекул по скоростям при выливании части воды не изменилось. Тогда:

$$\overline{W_{\text{к}2}} = \overline{W_{\text{к}1}};$$

$$\overline{W_{\text{к}2}} = \frac{3}{2}kT_2; \qquad \overline{W_{\text{к}1}} = \frac{3}{2}kT_1;$$

$$T_2 = T_1.$$

2. Принятое допущение справедливо, так как число частиц в рассматриваемых системах огромно, и в оставшейся части воды распределение частиц по скоростям такое же, как и в исходной системе.

Дано:
воздух в негерметичной комнате;
$T_2 > T_1$
$p_1 = p_0$
$p_2 = p_0$
$V_1 = V_2 = V_{\text{комнаты}}$
ΔU —?

Решение:

1. Будем считать воздух идеальным газом:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT; \qquad pV = \frac{m}{M}RT.$$

2. Запишем формулу для внутренней энергии воздуха в двух состояниях (до и после протапливания) выражая ее через давление и объем газа:

$$U_1 = \frac{3}{2}\frac{m_1}{M}RT_1 = \frac{3}{2}p_1V_1 = \frac{3}{2}p_0V_{\text{комн}};$$

$$U_2 = \frac{3}{2}\frac{m_2}{M}RT_2 = \frac{3}{2}p_2V_2 = \frac{3}{2}p_0V_{\text{комн}};$$

Следовательно: $U_2 = U_1$.

Задача 1. Если из стакана вылить часть воды, то суммарная кинетическая энергия молекул воды уменьшится. Означает ли это, что: а) внутренняя энергия воды уменьшится; б) температура воды уменьшится?

Внутренняя энергия термодинамической системы зависит от числа структурных частиц N_1, а оно уменьшится до N_2, если часть воды вылить из стакана. Поэтому внутренняя энергия оставшейся воды будет меньше внутренней энергии первоначальной массы воды.

Температура — мера средней кинетической энергии теплового движения частиц. В данном случае она может измениться только в том случае, если из стакана воды «вылить» ту ее часть, в которой находятся наиболее быстрые молекулы. Однако, это невозможно из-за того, что молекулы движутся хаотично и расположены хаотично. Кроме того, в стакане остается огромное число частиц, так что можно с большой степенью достоверности допустить, что распределение молекул по скоростям не изменится при выливании части воды. Следовательно, и средняя кинетическая энергия частиц не изменится, то есть температура останется той же.

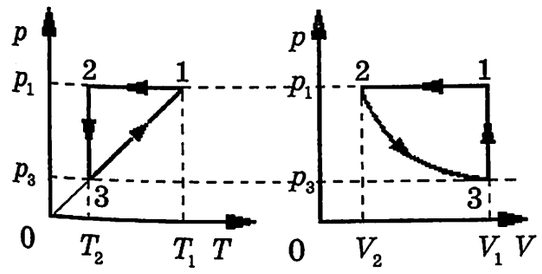
Задача 2. После включения нагревательного прибора температура воздуха в комнате повысилась. Увеличилась ли внутренняя энергия воздуха в комнате?

Комната негерметична. Поэтому в ней устанавливается давление, равное атмосферному в данный момент времени. Происходит это за счет изменения массы воздуха, который «входит» или «выходит» из помещения через щели.

Нагревание воздуха приводит к повышению температуры и в объеме комнаты давление увеличивается. Следовательно, возникает движение воздуха из комнаты наружу, которое прекращается, когда давление становится равным атмосферному.

Таким образом, один фактор — повышение температуры, приводит к увеличению внутренней энергии воздуха, а другой — уменьшение числа структурных частиц, — к уменьшению. Приведенные вычисления позволяют получить ответ: внутренняя энергия воздуха в помещении после его протапливания не увеличивается.

Графические задачи



$m = \text{const}; \qquad M = \text{const}.$

$1 \to 2$: $p = \text{const}; \quad T_2 < T_1; \quad \Delta T < 0;$
следовательно, $V_2 < V_1; \quad \Delta V < 0;$
изобарное охлаждение (сжатие).

$$Q = \Delta U + A';$$

$$\left.\begin{array}{ll} \Delta U \sim \Delta T, & \Delta U_{1,2} < 0; \\ A' \sim \Delta V, & A'_{1,2} < 0; \end{array}\right| \quad Q_{1,2} < 0,$$

газ отдает тепло окружающим телам (холодильнику).

$2 \to 3$: $T = \text{const}; \quad \Delta T = 0; \quad p_3 < p_2;$
следовательно, $V_3 > V_2; \quad \Delta V > 0;$
изотермическое расширение.

$$Q = \Delta U + A';$$

$$\left.\begin{array}{ll} \Delta U \sim \Delta T, & \Delta U_{2,3} = 0; \\ A' \sim \Delta V, & A'_{2,3} > 0; \end{array}\right| \quad Q_{2,3} > 0,$$

газ получает тепло от окружающих тел (от нагревателя).

$3 \to 1$: $V = \text{const}; \quad \Delta V = 0; \quad p_3 < p_1;$
$T_3 < T_1; \quad \Delta T > 0;$
изохорное нагревание.

$$Q = \Delta U + A';$$

$$\left.\begin{array}{ll} \Delta U \sim \Delta T, & \Delta U_{3,1} > 0; \\ A' \sim \Delta V, & A'_{3,1} = 0; \end{array}\right| \quad Q_{3,1} > 0,$$

газ получает тепло от окружающих тел (от нагревателя).

$1 \to 2 \to 3 \to 1$:

$$A'_\circ = A'_{1,2} + A'_{2,3} + A'_{3,1} = A'_{1,2} + A'_{2,3} < 0,$$

так как площадь под графиком процесса $1 \to 2$ больше площади под графиком процесса $2 \to 3$, изображенных в координатах p,V, а знаки работы в этих процессах противоположные.

Задача 3. На рисунке изображен циклический процесс, проведенный с некоторой массой идеального газа. Опишите характер теплообмена в каждом процессе цикла. Каков знак работы, совершенной газом за весь цикл? Масса газа и его молярная масса не меняются.

Для того, чтобы можно было безошибочно делать выводы относительно значения и знака работы, которую совершает газ в любых процессах, удобно воспользоваться графической интерпретацией работы.

Для этого нужно изобразить данный циклический процесс в координатных осях (p,V). (Как сделать это, мы показали в § 31).

Поскольку при решении задачи потребуется применять первый закон термодинамики, нужно определить знаки работы газа и изменения его внутренней энергии в каждом процессе цикла.

А для определения значений и знаков работы газа и изменения внутренней энергии газа нужно знать, как меняются в каждом процессе термодинамические параметры.

Поэтому, перестраивая исходный график циклического процесса в координатных осях (p,V), мы сразу получаем информацию, необходимую для решения задачи.

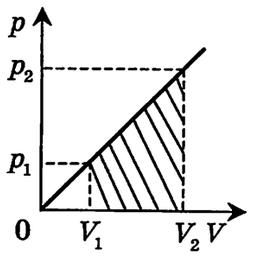
В процессе $1 \to 2$ происходит изобарное охлаждение (или, что то же, сжатие) газа. Поэтому работа газа отрицательна по знаку. Изменение внутренней энергии в этом процессе также отрицательно из-за уменьшения температуры газа. Следовательно, для осуществления процесса требуется контакт с холодильником, то есть телом, имеющим более низкую температуру: в этом процессе газ отдает тепло холодильнику.

В процессе $2 \to 3$ происходит изотермическое расширение газа, следовательно, его внутренняя энергия не меняется, а совершаемая газом работа имеет положительный знак, как и знак изменения объема. Значит, в этом процессе газ получает тепло от нагревателя.

Значение совершенной газом работы меньше, чем в предыдущем процессе, так как площадь под графиком этого процесса в координатах (p,V) меньше.

Наконец, в процессе $3 \to 1$ — изохорное нагревание, газ работы не совершает и полученное от нагревателя количество теплоты идет на увеличение его внутренней энергии.

Дано:
идеальный газ
$p = \alpha V$
V_1
V_2
$A' - ?$
$Q - ?$



$$p_1 = \alpha V_1;$$

$$p_2 = \alpha V_2;$$

1. Работа газа численно равна площади трапеции с основаниями p_1 и p_2 и высотой $(V_2 - V_1)$, т.е.:

$$A' = \frac{p_1 + p_2}{2} \cdot (V_2 - V_1);$$

$$A' = \frac{\alpha V_1 + \alpha V_2}{2} \cdot (V_2 - V_1) = \frac{\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{2} > 0;$$

2. Для определения количества теплоты найдем изменение внутренней энергии газа:

$$pV = \nu RT; \quad \alpha V \cdot V = \nu RT; \quad \alpha V^2 = \nu RT;$$

$$T_1 = \frac{\alpha V_1^2}{\nu R}; \quad T_2 = \frac{\alpha V_2^2}{\nu R}; \quad \Delta T = \frac{\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{\nu R};$$

$$\Delta T > 0; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{2} > 0;$$

3. Применяя первый закон термодинамики, получим:

$$Q = \Delta U + A';$$

$$Q = \frac{3\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{2} + \frac{\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{2} = 2\alpha (V_2^2 - V_1^2) > 0.$$

Расчетные задачи

Задача 4. Идеальный газ расширяется по закону $p = \alpha V$. Найти графически работу, совершенную газом при увеличении его объема от значения V_1 до значения V_2. Поглощается или выделяется тепло в этом процессе?

Начнем решение данной задачи с построения графика этого процесса в координатах (p,V). Это позволит нам в дальнейшем воспользоваться графической интерпретацией работы и подсчитать ее значение.

Давление газа в рассматриваемом процессе зависит от его объема прямо пропорционально. Следовательно, график представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат.

Отложим на оси объемов значения V_1 и V_2 и выделим фигуру (прямоугольную трапецию), площадь которой численно равна работе газа в этом процессе.

Основаниями трапеции являются значения давления газа при заданных значениях его объема. Найдем их, пользуясь уравнением $p(V)$, а затем подсчитаем значение работы.

Для подсчета значения внутренней энергии найдем температуру газа в каждом состоянии. Для этого воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона и, подставляя в него выражение для давления газа, получим связь между температурой и объемом газа в данном процессе.

Находя изменение температуры при заданном изменении объема газа, вычислим изменение внутренней энергии.

Поскольку и работа газа, и изменение внутренней энергии положительны, то в данном процессе газ получает тепло от нагревателя.

Задача 5. Объем 160 г аргона, температура которого была равна 27°С, при изобарном нагревании увеличился вдвое. Найти работу газа при расширении, изменение его внутренней энергии и количество теплоты, которое пошло на осуществление этого процесса.

Дано:	*СИ:*	*Справочные:*
аргон		$M_r = 40$
$m = 160$ г	0, 16 кг	
$t^\circ = 27^\circ$C	300 К	
$V_2 = 2V_1$		
$A' - ?$		
$\Delta U - ?$		
$Q - ?$		

Решение:

1. Работа при изобарном расширении газа:

$$A' = p\Delta V;$$

Воспользуемся формулой для расчета работы газа в изобарном процессе.

Поскольку значения давления и объема газа в условии задачи не заданы в явном виде, воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона.

Запишем это уравнение для двух состояний газа: начального и конечного, в котором объем газа увеличился вдвое по сравнению с начальным.

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1;$$

$$pV_2 = \frac{m}{M} RT_2;$$

$$p(V_2 - V)_1 = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1);$$

$$A' = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Поскольку давление газа в процессе не менялось, получим, вычитая из второго уравнения первое, другую формулу для работы газа в изобарном процессе. В ней работа газа связана с изменением температуры газа.

Пользуясь этой формулой, можно было бы сразу рассчитать работу газа, если бы была известна конечная температура газа в процессе.

Найдем ее, пользуясь законом Гей-Люссака. По условию задачи известно, что объем газа увеличился вдвое. А так как при изобарном процессе отношение значений объемов равно отношению температур, соответствующих тем же состояниям газа, то получим, что и температура газа увеличилась вдвое.

Так как начальное значение температуры известно, то рассчитав конечное и находя изменение температуры рассчитаем сначала работу газа.

Затем пользуясь формулой для расчета значения внутренней энергии идеального одноатомного газа (в условии задачи речь идет об аргоне. Это инертный газ. А все инертные газы — одноатомные.), рассчитаем изменение внутренней энергии.

Количество теплоты, переданное газу в этом процессе подсчитаем по первому закону термодинамики.

2. В изобарном процессе по закону Гей-Люссака:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = 2 \text{ (по условию);}$$

следовательно, $T_2 = 2T_1$. Тогда:

$$A' = \frac{m}{M} R(2T_1 - T_1) = \frac{m}{M} RT_1.$$

3. Для внутренней энергии получим:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1.$$

4. По первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta U + A' = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT + \frac{m}{M} RT = \frac{5m}{2M} RT.$$

5. Проведем вычисления:

$$A' = \frac{0{,}16 \cdot 8{,}31 \cdot 300}{40 \cdot 10^{-3}} \approx 10^4 \text{ (Дж);}$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 10^4 = 1{,}5 \cdot 10^4 \text{ (Дж);}$$

$$Q = 2{,}5 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Задача 6. При изохорном нагревании 50 г гелия его температура повысилась на 40° С. Какое количество теплоты было передано гелию в этом процессе?

Гелий — инертный газ, следовательно, он одноатомный. Будем считать его идеальным газом. Относительную массу атома найдем в периодической системе.

В изохорном процессе объем газа не меняется, следовательно, газ работы не совершает.

В таком случае, количество теплоты, переданной газу, равно изменению его внутренней энергии.

Воспользуемся формулой для подсчета внутренней энергии идеального газа. Тогда изменение внутренней энергии будет прямо пропорционально изменению температуры. Выполняя расчет, получим количество теплоты, переданное газу.

Дано:	*СИ:*	*Справочные:*
гелий		$M_r = 4$
$m = 50$ г	0, 05 кг	
$\Delta t^\circ = 40^\circ$C	40 К	
$Q - ?$		

Решение:

1. $Q = \Delta U + A';$

$A' = 0$, так как $A' \sim \Delta V$, $\Delta V = 0$, в изохорном процессе. Следовательно: $Q = \Delta U$.

2. $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T; \qquad Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T.$

3. Выполним расчет:

$$Q = \frac{3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}31 \cdot 40}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 6{,}2 \cdot 10^3 \text{ (Дж).}$$

Дано: *СИ:*

идеальный одноатомный газ

$V_1 = 3$ л $3 \cdot 10^{-3}$ м³

$p_1 = 0{,}4$ МПа $0{,}4 \cdot 10^6$ Па

$t_1^\circ = 27^\circ$C 300 К

$V_2 = 6$ л $6 \cdot 10^{-3}$ м³

$p_2 = 0{,}7$ МПа $0{,}7 \cdot 10^6$ Па

$t_2^\circ = 127^\circ$ C 400 К

p — ?

T — ?

Решение:

1. По закону сохранения энергии внутренняя энергия газа не меняется после их смешивания:

$$U_1 + U_2 = U;$$

$$U_1 = \frac{3}{2}\nu_1 RT_1;\ U_2 = \frac{3}{2}\nu_2 RT_2;\ U = \frac{3}{2}(\nu_1 + \nu_2)RT;$$

$$\nu_1 T_1 + \nu_2 T_2 = (\nu_1 + \nu_2)T.$$

Следовательно: $T = \dfrac{\nu_1 T_1 + \nu_2 T_2}{\nu_1 + \nu_2}$.

2. В начальном состоянии для каждого газа имело место следующее:

$$p_1 V_1 = \nu_1 RT_1; \qquad p_2 V_2 = \nu_2 RT_2;$$

$$\nu_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1}; \qquad \nu_2 = \frac{p_2 V_2}{RT_2};$$

Следовательно:

$$T = \frac{\dfrac{p_1 V_1}{RT_1} T_1 + \dfrac{p_2 V_1}{RT_2} T_2}{\dfrac{p_1 V_1}{RT_1} + \dfrac{p_2 V_2}{RT_2}} = \frac{T_1 T_2 (p_1 V_1 + p_2 V_2)}{p_1 V_1 T_2 + p_2 V_2 T_1}.$$

3. Конечное давление газа найдем из уравнения состояния: $p(V_1 + V_2) = (\nu_1 + \nu_2)RT;$

$$p = \frac{(\nu_1 + \nu_2)RT}{V_1 + V_2} = \frac{\left(\dfrac{p_1 V_1}{RT_1} + \dfrac{p_2 V_2}{RT_2}\right)RT}{V_1 + V_2} =$$

$$= \frac{p_1 V_1 T_2 + p_2 V_2 T_1}{(V_1 + V_2)T_1 T_2} \cdot \frac{T_1 T_2 (p_1 V_1 + p_2 V_2)}{p_1 V_1 T_2 + p_2 V_2 T_1} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2};$$

4. Проведем вычисления:

$$T = \frac{300 \cdot 400(0{,}4 \cdot 3 + 0{,}7 \cdot 6) \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}}{(0{,}4 \cdot 3 \cdot 400 + 0{,}7 \cdot 6 \cdot 300) \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}} = 372 \text{ К};$$

$$p = \frac{(0{,}4 \cdot 3 + 0{,}7 \cdot 6) \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}}{(3 + 6) \cdot 10^{-3}} = 0{,}6 \cdot 10^6 \text{ (Па)}.$$

Задача 7. Два теплоизолированных цилиндра объемами 3л и 6 л соединены между собой короткой тонкой трубкой с краном. В сосудах находится одинаковый идеальный газ, причем в первом цилиндре давление и температура газа равны соответственно 0,4 МПа и 27°С, а в другом давление газа равно 0,7 МПа при температуре 127° С. Какая температура и какое давление установятся в цилиндрах после того, как кран соединительной трубки будет открыт?

Рассмотрим термодинамическую систему, состоящую из газов в цилиндрах. После открывания крана они взаимодействуют только друг с другом, цилиндры теплоизолированы, поэтому (по закону сохранения энергии) их внутренняя энергия остается неизменной.

Выражая внутреннюю энергию каждого газа в отдельности и смеси газов после перемешивания из формулы, и приравнивая их, получим выражение для температуры газа после перемешивания.

В полученную формулу входят количества вещества, первоначально содержащиеся раздельно. Чтобы найти их, воспользуемся уравнением состояния идеального газа для каждого цилиндра.

Подставляя выражение для количества вещества в формулу для определения температуры смеси, получим окончательное выражение, позволяющее вычислить температуру смеси после перемешивания.

Установившееся в цилиндрах после открывания крана давление также найдем из уравнения состояния идеального газа. Учтем при этом, что объем и количество вещества — аддитивные величины.

После открывания кранов газ будет заполнять суммарный объем цилиндров, а количество вещества в нем будет равно сумме количеств вещества, находящихся первоначально в каждом цилиндре в отдельности.

Подставляя в уравнение состояния выражения для количества вещества и температуры газа и проводя несложные (но громоздкие) вычисления, получим окончательный вариант формулы для расчета давления газа.

Обратите внимание на полученные результаты и сравните их с начальными значениями температуры и давления каждого газа.

Дано: *СИ:*

идеальный одноатомный газ

$p_1 = 3$ атм $3 \cdot 10^5$ Па

$t_1^\circ = 0^\circ$C 273 К

$V_1 = 2$ м³

$A = 35$ кДж $35 \cdot 10^3$ Дж

T — ?

Решение:

1. Так как газ сжимают без теплообмена с окружающей средой, то $Q = 0$ и $\Delta U + A' = 0;$

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T.$$

2. Из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M}RT_1; \qquad \frac{m}{M}R = \frac{p_1 V_1}{T_1};$$

Тогда: $\Delta U = \dfrac{3}{2}\dfrac{p_1 V_1}{T_1}(T_2 - T_1).$

3. Известна работа, совершенная в процессе над газом, следовательно: $A \equiv A_{\text{внешн}} = -A'.$

Значит: $\Delta U + A' = 0; \qquad \Delta U = -A' = A.$

$$A = \frac{3}{2}\frac{p_1 V_1}{T_1}(T_2 - T_1);$$

$$T_2 = \frac{2AT_1}{3p_1 V} + T_1 = \left(\frac{2A}{3p_1 V} + 1\right)T_1;$$

4. Проведем расчеты:

$$T_2 = \left(\frac{2 \cdot 35 \cdot 10^3}{3 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 2} + 1\right) \cdot 273 = 284 \text{(К)}.$$

Дано: *СИ:* *Справочные:*

стекло $c_1 = 670$ Дж/ (кг К)

$m_1 = 120$ г 0,12 кг

$t_{01}^\circ = 20^\circ$C

вода $c_2 = 4200$ Дж/(кг К)

$m_2 = 200$ г 0,2 кг

$t_{02}^\circ = 100^\circ$C

$t_к^\circ = 40^\circ$C

$t = 5$ мин 300 с

Q/t —?

Решение:

1. Рассмотрим термодинамическую систему из трех тел: стакан, вода, окружающая среда.

Тогда $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$, где Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, которыми стакан, вода и окружающая среда обменивались друг с другом.

Задача 8. Одноатомный идеальный газ при давлении 3 атм и температуре 0°С занимает объем 2 м³. Газ сжимают без теплообмена с окружающей средой, совершая при этом работу 35 кДж. Какова конечная температура газа?

Поскольку происходит адиабатное сжатие газа, то есть количество теплоты равно нулю, то из первого закона термодинамики получаем: изменение внутренней энергии газа в сумме с работой газа дает ноль.

Для того, чтобы найти изменение внутренней энергии газа воспользуемся формулой для подсчета внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии происходит только за счет изменения температуры, причем начальное значение температуры газа известно.

Запишем изменение температуры в явном виде и выразим количество вещества в сосуде из уравнения Менделеева-Клапейрона. В полученном равенстве в правой части имеется только одно неизвестное — конечная температура газа T_2.

Следовательно, ее можно найти, если учесть, что в данном процессе работа газа равна работе внешних тел, взятой с противоположным знаком. То есть изменение внутренней энергии газа равно работе внешних тел над газом.

Подставляя работу газа вместо изменения внутренней энергии, выразим конечную температуру газа через известные величины и проведем расчет.

Задача 9. В стеклянный стакан, имеющий массу 120 г и температуру 20°С налили 200 г воды, имеющей температуру 100°С. Через 5 минут температура стакана с водой стала равной 40°С. Предполагая, что потеря теплоты происходила равномерно, найти потерю теплоты за 1 с.

Так как происходил теплообмен между тремя телами: водой, стаканом и окружающей средой, то составим термодинамическую систему из этих трех тел.

Тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид: сумма количеств теплоты, которыми обменивалось каждое тело с остальными двумя, равна нулю.

Поскольку в отношении двух тел: стакана и воды известны начальные и конечные температуры, массы и удельные тепло-

2. $Q_1 = c_1 m_1 \left(t_к^\circ - t_{01}^\circ\right)$;

$Q_2 = c_2 m_2 \left(t_к^\circ - t_{02}^\circ\right)$;

$Q_3 = -(Q_1 + Q_2) = -c_1 m_1 \left(t_к^\circ - t_{01}^\circ\right) - c_2 m_2 \left(t_к^\circ - t_{02}^\circ\right)$;

3. Так как окружающая среда получила такое количество теплоты за t секунд, то:

$$\frac{Q_3}{t} = \frac{-c_1 m_1 \left(t_к^\circ - t_{01}^\circ\right) - c_2 m_2 \left(t_к^\circ - t_{02}^\circ\right)}{t};$$

4. Выполним расчет:

$$\frac{Q_3}{t} = \frac{-670 \cdot 0{,}12 \cdot 20 - 4200 \cdot 0{,}2 \cdot (-60)}{300} \approx 163 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{с}}\right).$$

Дано:

1. вода; $t_{0в}^\circ = 10^\circ\text{C}$
   тело 1; $t_{0т}^\circ = 100^\circ\text{C}$
   $t_к^\circ = 40^\circ\text{C}$
2. вода; $t_{1в}^\circ = t_к^\circ = 40^\circ\text{C}$
   тело 1; $t_{1т}^\circ = t_к^\circ = 40^\circ\text{C}$
   тело 2; $t_{2т}^\circ = 100^\circ\text{C}$

ϑ — ?

Решение:

1. Допустим, что потерь энергии не происходит и теплоемкостью калориметра можно пренебречь.

Система I (вода + тело1): $Q_1 + Q_2 = 0$;

$$C_в(t_к^\circ - t_{0в}^\circ) + C_т(t_к^\circ - t_{0т}^\circ) = 0.$$

2. Система II (вода + тело 1 + тело 2):

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0;$$

$$C_в(\vartheta - t_к^\circ) + C_т(\vartheta - t_к^\circ) + C_т(\vartheta - t_{2т}^\circ) = 0,$$

так как тела одинаковы, то есть имеют одинаковые теплоемкости.

3. Перепишем равенства, уединяя слагаемое имеющее отношение к воде, и разделим почленно:

$$C_в(t_к^\circ - t_{0в}^\circ) = -C_т(t_к^\circ - t_{0т}^\circ);$$

$$C_в(\vartheta - t_к^\circ) = -C_т(\vartheta - t_к^\circ) - C_т(\vartheta - t_{2т}^\circ);$$

$$\frac{t_к^\circ - t_{0в}^\circ}{\vartheta - t_к^\circ} = \frac{t_к^\circ - t_{0т}^\circ}{\vartheta - t_к^\circ + \vartheta - t_{2т}^\circ};$$

$$\vartheta = \frac{t_к^\circ \left(t_{0т}^\circ - t_{0в}^\circ\right) + t_{2т}^\circ \left(t_к^\circ - t_{0в}^\circ\right)}{t_к^\circ + t_{0т}^\circ - 2t_{0в}^\circ};$$

4. Проведем расчет:

$$\vartheta = \frac{40^\circ \left(100^\circ - 10^\circ\right) + 100^\circ \left(40^\circ - 10^\circ\right)}{40^\circ + 100^\circ - 2 \cdot 10^\circ} = 55^\circ.$$

емкости, то количества теплоты, которыми они обменивались с двумя другими телами, можно подсчитать.

Тогда уравнение теплового баланса позволит вычислить и количество теплоты, которое получила в результате теплообмена окружающая среда.

(При проведении преобразований обратите внимание на знаки: в формуле для расчета количества теплоты всегда фигурирует изменение температуры.)

Поскольку это количество теплоты окружающая среда получила за 300 с, то нетрудно подсчитать, какое количество теплоты она получала за 1 с. Обратите внимание на знак полученной величины — он положительный, что означает, что окружающая среда получала тепло.

Задача 10. При опускании в воду, имеющую температуру 10° С, тела, нагретого до температуры 100°С, через некоторое время установилась температура 40° С. Какой станет температура воды, если (не вынимая первого тела) в нее погрузить второе такое же, нагретое до 100° С?

Рассмотрим поочередно две системы тел. Первая состоит из воды и первого тела. Вторая включает в себя воду, первое тело и второе тело.

Поскольку обе системы теплоизолированные, то теплообмен происходит только между телами каждой системы, и для каждой из них можно записать свое уравнение теплового баланса.

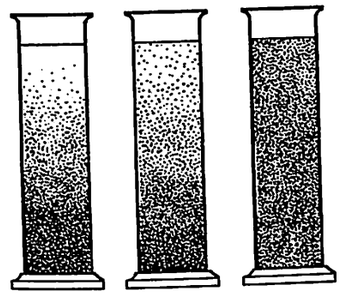
При записи уравнений обозначим теплоемкости воды и каждого тела большой буквой C с соответствующим индексом и учтем, что первое и второе тела одинаковы, то есть их теплоемкости равны.

Чтобы исключить из уравнений неизвестные нам теплоемкости, уединим слагаемое, содержащее теплоемкость воды. Тогда во второй части равенства останутся слагаемые, имеющие одинаковые множители — теплоемкость первого или второго тела.

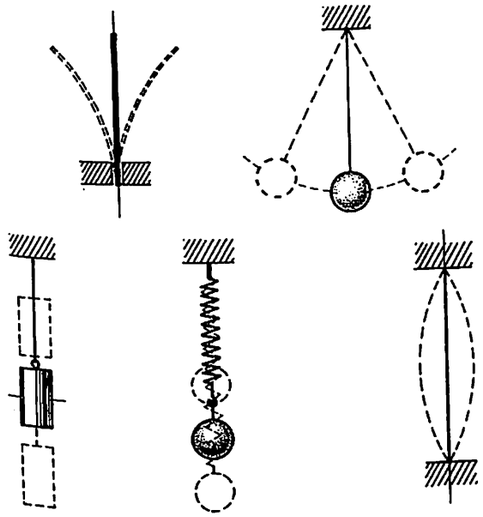
Разделив одно равенство на другое, неравное нулю, получим выражение, содержащее одно неизвестное — температуру, которая установится в калориметре после опускания в него второго тела.

Проводя преобразования получим формулу для неизвестной температуры и проведем расчет.

§ 36. НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ



Закон сохранения энергии не запрещает, например, ионам меди самопроизвольно собраться на дне или в каком-то другом месте сосуда, однако такое явление никогда не наблюдается.



Свободные колебания в любых механических (и в электромагнитных) системах со временем всегда затухают. Однако, закон сохранения энергии не запрещает молекулам воздуха передать часть своей энергии (и при этом охладиться) колебательной системе и возбудить в ней колебания.

Процессы в природе имеют определенную направленность, никак не отраженную в первом законе термодинамики.

Все процессы в природе самопроизвольно протекают только в одном направлении.

В противоположном направлении самопроизвольно эти процессы протекать не могут.

Закон сохранения энергии — как мы уже неоднократно говорили — фундаментальный закон природы. Науке неизвестно ни одного факта, когда бы этот закон нарушался. Если какой-то процесс запрещен законом сохранения энергии, то можно быть уверенным в том, что наблюдать его не суждено. Однако этот закон не дает никаких указаний о том, в каком направлении могут происходить процессы, удовлетворяющие этому закону.

Приведем поясняющие примеры. Известно, что самопроизвольное направление теплообмена определяется разностью температур тел, участвующих в нем: тепловая энергия всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому. Но первый закон термодинамики не был бы нарушен, если бы энергия передавалась от менее нагретого тела к более нагретому так, чтобы общий запас внутренней энергии оставался неизменным.

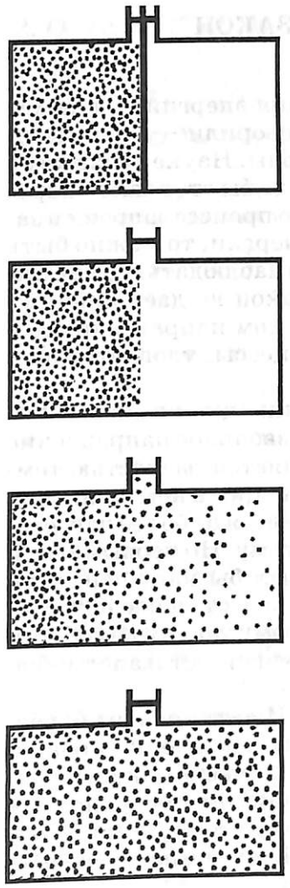
Другой пример. Известно, что колебания груза на пружине постепенно прекращаются, так как механическая энергия системы постепенно целиком превращается во внутреннюю энергию груза, пружины и окружающего воздуха: их температура обязательно увеличивается.

Энергетически допустим и другой процесс, когда амплитуда колебаний маятника повышается за счет охлаждения самого маятника и окружающего воздуха. Но такой процесс никогда не наблюдается.

Анализ множества подобных примеров показывает, что процессы в природе происходят самопроизвольно в определенном направлении: механическая энергия тел способна самопроизвольно переходить во внутреннюю, но не наоборот.

Эти опыты показывают, что разные формы энергии неравноценны с точки зрения их способности превращаться в другие формы. Например, механическую и электрическую энергию можно целиком превратить во внутреннюю, независимо от того, какова температура тела.

Внутреннюю энергию тела ни при каких условиях нельзя целиком превратить в другие виды энергии. С этими особенностями энергетических превращений и связано направление протекания процессов в природе. **Все процессы в природе необратимы.**



*Чтобы расширить газ **обратимым** образом, нужно выдвигать поршень бесконечно медленно. При этом давление газа во всех точках во все моменты времени будет одинаковым, а состояние газа будет зависеть от положения поршня, а не направления его движения. В этом случае процесс будет обратимым. Необратимость процесса расширения газа в пустоту без совершения работы, является наиболее ярким проявлением необратимости самопроизвольных, или спонтанных, процессов в природе.*

Необратимым в физике принято называть такой процесс, обратный которому может протекать только как одно из звеньев более сложного процесса.

Так например, амплитуда колебаний маятника может быть увеличена, если его подтолкнуть рукой. Но это увеличение амплитуды возникает не само по себе, а является звеном более сложного процесса, включающего в себя толчок рукой.

Можно также передать энергию от менее нагретого тела более нагретому, но для этого нужна холодильная установка, потребляющая энергию от какого-то автономного источника.

Газ самопроизвольно заполняет весь предоставленный ему объем, чтобы собрать его в определенной части сосуда потребуются определенные усилия.

Таким образом, направление процессов в природе подчиняется определенному закону. Он получил название **второго закона термодинамики** и также, как и первый закон, был установлен путем непосредственного обобщения опытных фактов.

Исторически открытие второго закона термодинамики было связано с изучением вопроса о максимальном коэффициенте полезного действия тепловых машин, проведенным французским ученым С. Карно.

Существует несколько формулировок этого закона, разных по форме, но отражающих, в сущности, одно и то же.

Мы приведем и прокомментируем две наиболее известные формулировки второго закона термодинамики, предложенные немецким физиком Р. Клаузиусом и английским ученым У. Томсоном (лордом Кельвиным).

Р. Клаузиус сформулировал этот закон так: невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

Р. Клаузиус
1822 — 1888

В формулировке У. Кельвина этот закон звучит так: невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой из одного источника. Или иначе: невозможно построить вечный двигатель второго рода (то есть двигатель, совершающий работу только за счет охлаждения какого-либо одного тела).

У. Томсон (лорд Кельвин)
1824 — 1907

Действительно, любой тепловой двигатель совершает работу за счет тепла, полученного от нагревателя, но совершение работы не является единственным результатом этого процесса.

Математически необратимость процессов выражается в том, что уравнения или начальные условия, описывающие эти процессы изменяются при изменении знака времени: $t \to -t$.

Знак скорости при замене t на $-t$ меняется на противоположный:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t} > 0; \qquad v_x = \frac{x - x_0}{-t} < 0;$$

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} > 0; \qquad a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{-t} > 0;$$

ускорение не меняет знак при замене t на $-t$. Силы, зависящие от расстояния, также не меняют знак при таком преобразовании. Поэтому только силы трения (или подобные им, зависящие от относительной скорости движения) совершают работу, которая уменьшает кинетическую энергию тела, переводя ее необратимо во внутреннюю.

Л. Больцман
1844 —1906

Стрела времени

1. Во всех процессах существует выделенное направление, в котором процессы происходят сами собой;
2. В процессах, протекающих самопроизвольно, более упорядоченные состояния заменяются на менее упорядоченные и беспорядочные;
3. Чем больше «порядок» в системе, тем труднее восстановить его из «беспорядка»;
4. Выделенное направление времени, воспринимаемое человеком, связано именно с направленностью процессов в мире.

Границы применимости второго закона термодинамики

Закон справедлив только для систем с огромным числом частиц (в системах с малым числом частиц могут наблюдаться флуктуации, случайные отклонения от равновесного состояния).

Часть теплоты обязательно уходит в атмосферу вместе с отработанным газом. Именно поэтому ни один тепловой двигатель не может иметь коэффициент полезного действия, равный единице.

Обе формулировки закона эквивалентны друг другу.* Действительно, существование вечного двигателя второго рода не противоречит закону сохранения энергии. Допустим, что такой двигатель возможен. Например, энергию для его работы мы черпаем из Мирового океана. При этом, конечно, воды океана охлаждаются. Однако, как только температура океана станет ниже температуры окружающей среды, дальнейшая работа такого двигателя означала бы возможность самопроизвольного перехода теплоты от менее нагретого тела к более нагретому, а такой процесс невозможен.

Но, констатируя факт необратимости процессов в природе, второй закон термодинамики не дает ему никакого объяснения.

Попробуем найти его, прибегнув к молекулярно-кинетической теории, ведь она дала ответы на многие неразрешимые другими способами вопросы.

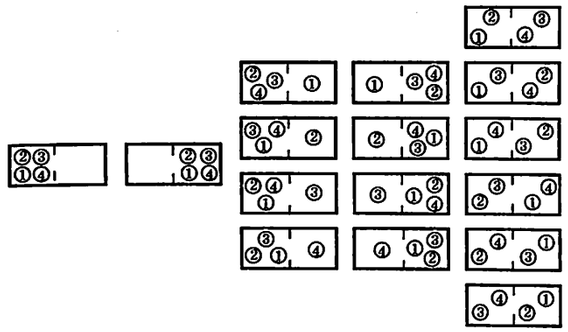
Однако, необратимость макропроцессов выглядит, на первый взгляд, парадоксально: ведь все микропроцессы обратимы!

Действительно, в микромире нет никаких «сил трения». Все силы в микромире, в первую очередь, электромагнитные, зависят только от взаимного положения частиц, и поэтому обратимы во времени. Уравнения движения молекулы тоже обратимы во времени, так как содержат только силы, зависящие от расстояний и проявляющиеся только при столкновении молекул. Таким образом, проблема теоретического обоснования второго закона термодинамики замыкается на согласовании факта обратимости микропроцессов с фактом необратимости макропроцессов. Заслуга в нахождении подхода к решению этой проблемы принадлежит Больцману.

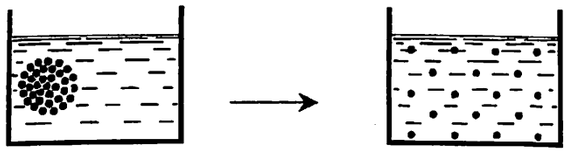
Мы уже не раз отмечали, что одному и тому же макроскопическому состоянию системы отвечает огромное число микроскопических состояний. Действительно, переход только одной молекулы на место другой уже означает изменение микросос-

* Строгое доказательство эквивалентности формулировок не входит в задачу нашего курса.

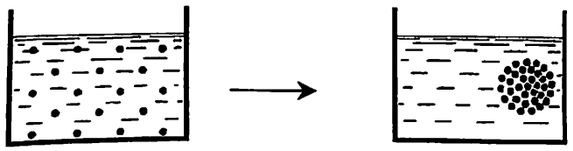
Определенное макросостояние термодинамической системы может быть реализовано огромным числом различных микросостояний



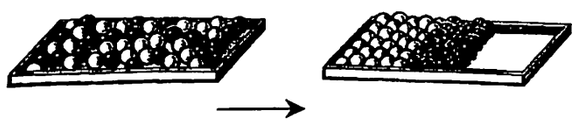
Наиболее вероятным состоянием газа, состоящего из 4-х молекул, является состояние, в котором в каждой половине сосуда находится по 2 молекулы.



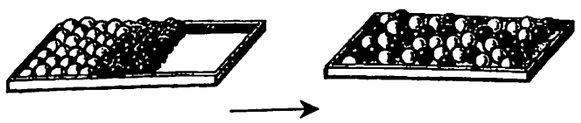
Такое направление процесса наиболее вероятно, так как конечному состоянию отвечает огромное число идентичных микросостояний



Обратный процесс так маловероятен, что никогда не наблюдается в природе



Чтобы осуществить такой процесс, то есть навести «порядок» в системе, необходимо совершить работу



Такой процесс весьма вероятен, он может происходить самопроизвольно в результате небольших случайных воздействий

тояния системы. Однако, это не приводит к изменению макросостояния системы, состоящей из огромного числа молекул, одной из которых является рассмотренная нами молекула.

Больцман высказал предположение, что все микроскопические состояния замкнутой системы равновероятны: ни одно из микросостояний ничем не выделяется из числа других, не занимает преимущественного положения.

Микросостояния непрерывно сменяют друг друга, а макросостояние остается неизменным. Чем больше микросостояний реализуют данное макросостояние, тем дольше данная система находится в этом макросостоянии, тем оно более «вероятно».

Таким образом, эволюция системы происходит в направлении от маловероятных состояний к состояниям более вероятным. Состояние теплового равновесия — наиболее вероятное состояние, так как ему отвечает наибольшее число микросостояний.

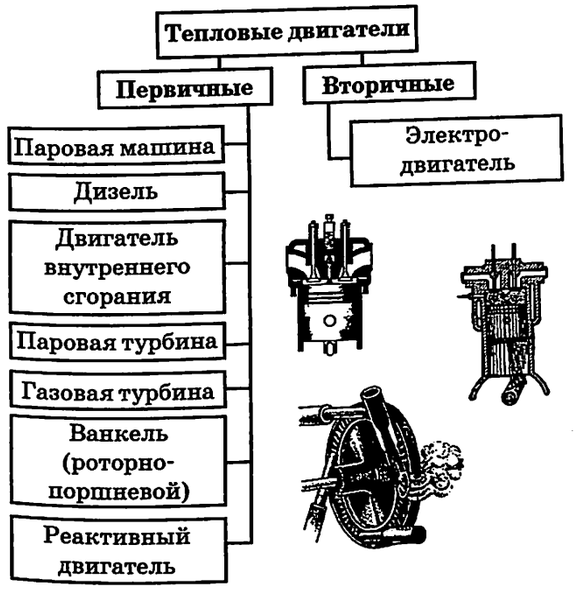
Обратный процесс не является невозможным, просто он чрезвычайно маловероятен. С этой точки зрения процесс механического движения тела — упорядоченный процесс, когда все части тела движутся сходным образом, одинаково. Такому движению отвечает небольшое число микросостояний по сравнению с тепловым, хаотическим движением.

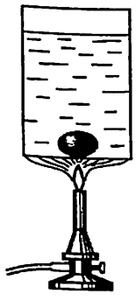
Именно поэтому маловероятное упорядоченное движение само собой превращается в более вероятное беспорядочное тепловое движение, реализуемое гораздо большим числом микросостояний.

Точно также и с переходом тепла от более нагретого тела к телу менее нагретому. Сначала у нас имеются две группы молекул: одна состоит из молекул, имеющих большую среднюю кинетическую энергию; другая — из медленных молекул, с малой кинетической энергией. Когда установится состояние теплового равновесия, будет всего одна группа, в которой большая часть молекул имеет некоторое наиболее вероятное значение энергии. Состояние, в котором молекулы по какому-то признаку разбиты на две группы, как более упорядоченное, просто перестает существовать.

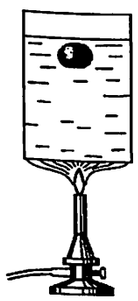
Таким образом, необратимость процессов в природе связана с переходом любой макроскопической системы в наиболее вероятное состояние, которому отвечает максимально возможный беспорядок.

§ 37. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

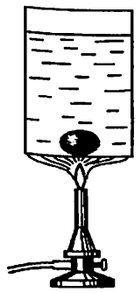




Рабочее тело (капля анилина), приведенное в контакт с нагревателем, получает тепло, расширяется и совершает работу, всплывая на поверхность воды.



Рабочее тело после совершения работы приводится в контакт с холодильником (холодные верхние слои воды), сжимается, совершая отрицательную работу и передавая некоторое количество теплоты холодильнику.



Рабочее тело возвращается в исходное состояние (опускается на дно сосуда). Вновь приводится в контакт с нагревателем и вновь совершает циклический процесс.

Запасы внутренней энергии на Земле можно считать практически неограниченными. Однако обладать запасами еще не означает уметь ими пользоваться. Для того, чтобы эти «запасы» стали приносить пользу людям, приводя в движение станки, транспортные средства, вырабатывать электроэнергию и тому подобное, нужны устройства, способные за счет этой внутренней энергии совершать работу.

Большинство первичных двигателей на Земле — это тепловые двигатели, то есть устройства превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Необратимость тепловых процессов налагает определенные ограничения на возможность преобразования внутренней энергии в механическую. Это, в частности, отражено в формулировке второго закона термодинамики, предложенной Кельвином. Поэтому создавая тепловую машину, важно задуматься над таким вопросом: каким может быть максимально возможный коэффициент полезного действия такого устройства?

Собственно, попытки найти ответ на этот вопрос и привели французского инженера и ученого С. Карно к созданию идеальной тепловой машины, у которой коэффициент полезного действия максимальный.

Однако, прежде чем рассказать о цикле Карно, рассмотрим принципы действия тепловых машин.

Простейшую тепловую машину может создать каждый из вас. Для этого нужно на дно стакана с водой опустить каплю анилина и вопользоваться в качестве нагревателя обычной спиртовкой или электрической плиткой. Выбор вещества капли обусловлен тем, что его плотность при нагревании уменьшается быстрее, чем плотность воды.

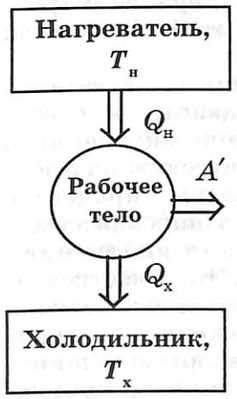
Поэтому когда в нижней части стакана (**нагреватель**) температура повышается, капля анилина начинает подниматься вверх. Там температура ниже, чем внизу, (**холодильник**), поэтому плотность анилина становится больше и капля опускается на дно.

Механическое движение капли анилина — **периодическое**. Каждый раз, поднимаясь вверх, капля совершает положительную работу за счет внутренней энергии, полученной от нагревателя. Если внизу ее «нагружать», а вверху разгружать, то она

Принципы действия теплового двигателя:

1. Периодичность *обеспечивает возможность получения любой необходимой работы при работе данного двигателя*

2. Цикличность *обеспечивается наличием нагревателя и холодильника*

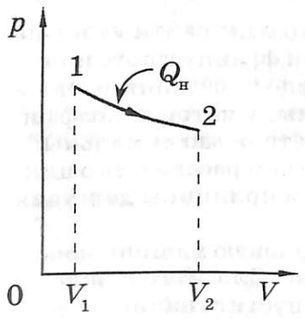


$$A' = Q_н - |Q_х|;$$

$$\eta = \frac{A'}{Q_н} \cdot 100\%;$$

$$\eta = \frac{Q_н - |Q_х|}{Q_н} \cdot 100\%;$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_х|}{Q_н} \cdot 100\%;$$



$1 \to 2$:

$$T_1 = T_2 = T_н = \text{const};$$

$$\Delta U_1 \sim \Delta T;\ \Delta T = 0;$$

$$\Delta U_1 = 0;$$

$$Q_1 \equiv Q_н = A'_1.$$

Рабочее тело (идеальный газ) получает тепло и за счет него совершает работу при изотермическом расширении.

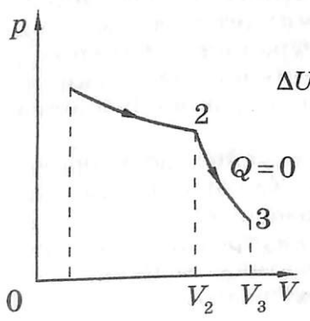
$2 \to 3$:

$$Q = 0;$$

$$\Delta U_2 + A'_2 = 0;$$

$$\Delta U_2 = -A'_2 < 0;$$

$$\Delta U_2 \sim \Delta T_2;\ \Delta T_2 = T_х - T_н.$$



Газ адиабатно расширяется, совершая работу за счет собственной внутренней энергии. Его температура уменьшается до температуры холодильника.

может использоваться в качестве «подъемника».

Ее тепловое состояние периодически возвращается в исходное, то есть термодинамический процесс оказывается **циклическим.** Наконец, когда верхние слои воды прогреются (исчезнет холодильник), работа машины прекратится.

Таким образом, для работы теплового двигателя необходимы: а) рабочее тело, которое, б) получая тепло от нагревателя, в) совершает работу и г) часть энергии отдает холодильнику, получая возможность вернуться в исходное состояние (цикличность) и снова совершить работу (периодичность).

Рабочим телом во всех машинах является газ, так как при одном интервале температур, определяемым температурой нагревателя и температурой холодильника, изменение объема газа, а следовательно, и совершенная им работа, максимальны.

Принципиальная схема теплового двигателя приведена на рисунке. Там же приведены пояснения к расчету коэффициента полезного действия тепловой машины, который, как и обычно, определяется отношением полезной работы к затраченной энергии (в нашем случае, к количеству теплоты, полученному газом от нагревателя).

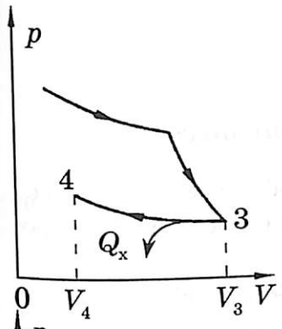
Обратите внимание, что в этом определении кпд фигурируют количества теплоты, которые были получены газом от нагревателя и переданы, после совершения работы, холодильнику.

Однако, в этом общем определении ничего не говорится о том, какой процесс происходит с газом, когда он получает тепло. А это важно, ведь в одних процессах, получая тело от нагревателя, газ может вовсе не совершать работы, или совершать незначительную работу, увеличивая свою внутреннюю энергию.

С. Карно придумал идеальную машину с идеальным газом. В его машине круговой процесс (цикл) состоит из двух изотермических и двух адиабатных равновесных (то есть обратимых) процессов.

Сначала газ, приведенный в контакт с нагревателем, изотермически расширяется, превращая в работу все полученное от нагревателя количество теплоты. Затем газ продолжает расширяться, но теперь адиабатно, то есть без теплообмена с окружающей средой.

В этом случае работа газа совершается за счет его собственной внутренней энергии, что приводит к уменьшению температуры газа.



$3 \to 4$:

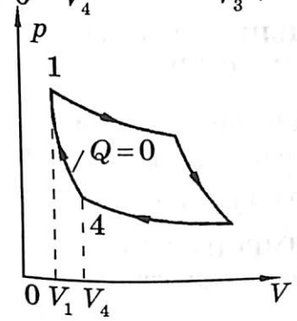
$$T_3 = T_4 = T_х = \text{const};$$

$$\Delta U_1 \sim \Delta T;\ \Delta T = 0;$$

$$\Delta U_1 = 0;$$

$$Q_1 \equiv Q_н = A'_3.$$

Газ изотермически сжимается, совершая работу за счет передачи тепла холодильнику.



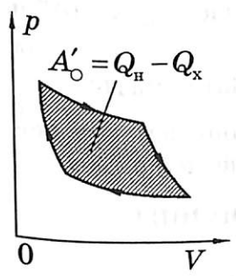
$4 \to 1$:

$$Q = 0;$$

$$\Delta U_4 + A'_4 = 0;$$

$$\Delta U_4 = -A'_4 > 0;$$

$$\Delta U_4 \sim \Delta T_4;\ \Delta T_4 = T_н - T_х.$$



$1 \to 2 \to 3 \to 4 \to 1$:

$$\Delta U_О = \Delta U_2 + \Delta U_4 = 0;$$

$$Q_О = Q_н + Q_х;$$

$$Q_н > 0; \qquad Q_х < 0;$$

$$Q_О = Q_н - |Q_х|;$$

$$A'_О = A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4;$$

$$A'_1 > 0,\ A'_2 > 0,\ A'_3 < 0,\ A'_4 < 0;$$

$$A'_2 + A'_4 = 0,$$

так как $\Delta U_2 + \Delta U_4 = 0$;

$$Q_н - |Q_х| = A'_1 + A'_3 = A'_О > 0.$$

$$\eta_{\text{идеальн}} = \frac{T_н - T_х}{T_н} \cdot 100\%;\quad \eta_{\text{идеальн}} = 1 - \frac{T_х}{T_н} \cdot 100\%.$$

Теорема Карно:
Любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру $T_н$, и холодильником, имеющим температуру $T_х$, не может иметь коэффициент полезного действия, превышающий кпд идеальной тепловой машины.

С. Карно
1796 — 1832

Но холодный газ невыгодно приводить в контакт с нагревателем, ведь тогда некоторое количество теплоты будет расходоваться на изменение его внутренней энергии без совершения работы. Следовательно, нужно продолжить сжатие газа, но теперь адиабатно. Тогда отрицательная работа газа будет приводить к увеличению его внутренней энергии и, следовательно, температуре. И опять, если рассчитать изменение объема газа при адиабатном сжатии так, чтобы в конце его температура газа была равна температуре нагревателя, то приведение в контакт газа и нагревателя не приведет к потерям энергии: газ сразу начнет совершать работу при изотермическом расширении.

Нетрудно видеть, что площадь цикла Карно, изображенного в координатах (p,V), численно равна полезной работе, совершенной газом за один цикл. Отсюда же можно допустить, что значение этой работы при данном изменении объема газа, тем больше, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника.

С. Карно теоретически показал, что этот цикл имеет максимально возможный кпд и он определяется только температурой нагревателя и температурой холодильника.

У реальных тепловых двигателей холодильником обычно является окружающая среда, в которую выбрасывается отработанный газ. Поэтому увеличение кпд можно достигать за счет увеличения температуры нагревателя. На этом пути ограничение накладывает теплостойкость или жаропрочность материалов.

Наиболее перспективным для повышения кпд считается работа по уменьшению трения между движущимися частями двигателя и уменьшения потерь топлива из-за его неполного сгорания. У современных двигателей кпд может достигать 44%.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

1. Идеальный газ
2. Термодинамическая система
3. Идеальная тепловая машина (двигатель)

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

1. Тепловое движение

МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

1. Равновесный (обратимый) процесс
2. Неравновесный (необратимый) процесс
3. Идеальный цикл Карно

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

1. Одному и тому же макроскопическому состоянию системы отвечает огромное число микроскопических состояний

2. Все микроскопические состояния замкнутой системы равновероятны: ни одно из микросостояний ничем не выделяется среди других, не занимает преимущественного положения.

3. Микросостояния термодинамической системы беспрерывно сменяют друг друга. Чем больше микросостояний реализуют данное макросостояние, тем дольше данная система находится в нем.

4. Эволюция термодинамической системы происходит в направлении от маловероятных состояний к состояним более вероятным, от состояний упорядоченных к состояниям с максимально возможным беспорядком.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Закон сохранения (полной) энергии
2. Первый закон термодинамики
3. Второй закон термодинамики

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ
первого и второго законов термодинамики

Рассматриваются только системы, состоящие из огромного числа частиц, $N \sim 10^{23}$ и более

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОПЫТЫ

Опыты Д. Джоуля по установлению теплового эквивалента механической работы

ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

1. Внутренняя энергия, U
2. Работа газа, A'
3. Количество теплоты, Q

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ИЗОПРОЦЕССАМ

Название процесса	Постоянный параметр	Переменные параметры	Изменение внутренней энергии	Работа газа	Уравнение первого закона	Количество теплоты
Изотермическое расширение	$m = \text{const}$	p, V	$\Delta T = 0$			
сжатие	$M = \text{const}$	$V \uparrow, p \downarrow$	$\Delta U = 0$	$\Delta V > 0;\ A' > 0;$	$Q = A';$	$Q > 0;$
	$T = \text{const}$	$V \downarrow, p \uparrow$	$\Delta U = 0$	$\Delta V < 0;\ A' < 0;$		$Q < 0;$
Изохорное нагревание	$m = \text{const}$	p, T		$\Delta V = 0;$		
охлаждение	$M = \text{const}$	$T \uparrow, p \uparrow$	$\Delta T > 0;\ \Delta U > 0;$	$A' = 0;$	$Q = \Delta U;$	$Q > 0;$
	$V = \text{const}$	$T \downarrow, p \downarrow$	$\Delta T < 0;\ \Delta U < 0;$	$A' = 0;$		$Q < 0;$
Изобарное нагревание	$m = \text{const}$	V, T				
охлаждение	$M = \text{const}$	$T \uparrow, V \uparrow$	$\Delta T > 0;\ \Delta U > 0;$	$\Delta V > 0;\ A' > 0;$	$Q = \Delta U + A';$	$Q > 0;$
	$p = \text{const}$	$T \downarrow, V \downarrow$	$\Delta T < 0;\ \Delta U < 0;$	$\Delta V < 0;\ A' < 0;$		$Q < 0;$
Адиабатное расширение	$m = \text{const}$	p, V, T				
сжатие	$M = \text{const}$	$T \downarrow, p \downarrow, V \uparrow$	$\Delta T > 0;\ \Delta U > 0;$	$\Delta V > 0;\ A' > 0;$	$\Delta U + A' = 0;$	$Q = 0;$
		$T \uparrow, p \uparrow, V \downarrow$	$\Delta T < 0;\ \Delta U < 0;$	$\Delta V < 0;\ A' < 0;$		

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Мы изучили основные физические теории, в которых главным «действующим лицом» являются физические модели: модель материальной точки или абсолютно твердого тела, точечный заряд, идеальный газ и т.п.

При построении этих моделей мы отвлекались от тех свойств реального объекта, которые в данном изучаемом явлении оказывались второстепенными. Однако, в большинстве реальных процессов эти свойства или особенности вещества нельзя не учитывать.

Например, идеальный газ нельзя превратить в жидкость, хотя взаимные превращения жидкости и газа постоянно происходят в природе и оказывают существенное влияние на формирование климата и жизнь человека.

Другой пример. Все атомы вещества состоят из ядер и электронов. Однако, твердые тела, жидкости и газы обладают разными механическими, тепловыми, электрическими и магнитными свойствами.

Одни вещества — хрупкие, другие пластичные. Металлы — хорошие проводники, а другие твердые вещества проводят ток очень плохо. Железо обладает способностью намагничиваться и долго сохранять такое состояние, а большинство металлов не обнаруживает магнитных свойств.

Подобные примеры можно приводить и далее. Но сейчас важно другое: как, пользуясь выводами основных физических теорий, объяснить многообразные свойства вещества, обнаружить закономерности и научиться пользоваться этими свойствами наилучшим способом?

Поэтому в последней главе нашего курса мы рассмотрим все свойства реальных газов, жидкостей и твердых тел — от механических и тепловых до электрических и магнитных и попробуем объяснить их на основе теоретических положений.

§ 38. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ИХ СВОЙСТВА

Механические свойства газов

В широком диапазоне давлений и температур для реального газа можно пользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона для расчета термодинамических (макроскопических) параметров газа:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

В сосуде объемом 1 л (10^{-3} м^3) при комнатной температуре (300 К) *давление, равное атмосферному* (10^5 Па), *создает воздух, масса которого равна:*

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8{,}31 \cdot 300} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ (\text{кг})$$

Давлением газа в сосуде удобно управлять, изменяя массу газа в нем: выпуская или нагнетая газ в сосуд при помощи насоса

Газы обладают рядом механических свойств, которые делают его незаменимыми в очень большом числе технических устройств. Многие особенности поведения газов, позволяющие использовать их на практике, можно легко объяснить с помощью модели идеального газа и уравнения состояния идеального газа.

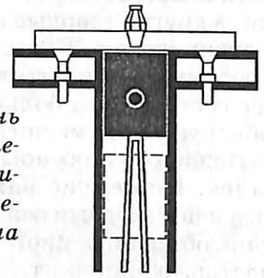
Газ, заполняющий любой сосуд, оказывает давление на его стенки. Сила давления газа представляет собой частный случай силы упругости, при этом газ подобен пружине, которая всегда сжата.

Важной особенностью является также то, что даже малые массы газа способны создавать сравнительно большие давления (см. расчетные задачи из § 30).

Давление газа можно сравнительно легко менять. Для этого можно воспользоваться разными приемами. Например, можно менять температуру газа или его объем. Но самым простым способом чаще всего оказывается изменение массы газа (обычно, воздуха).

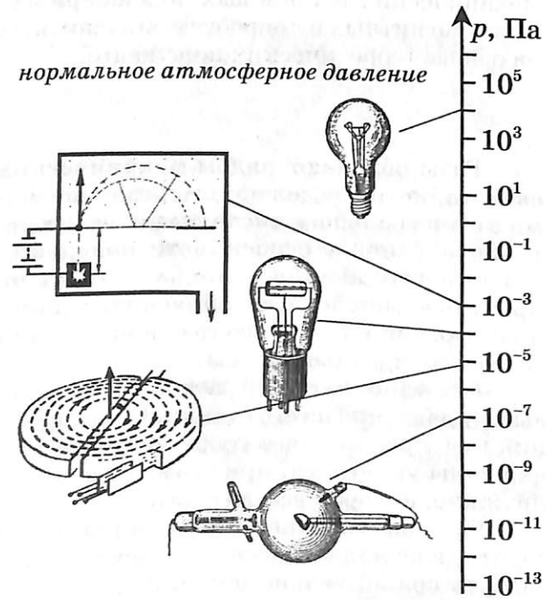
Так поступают, когда хотят увеличить или уменьшить давление в шинах, накачивая или выпуская воздух из них без изменения температуры или объема.

Газ — прекрасный амортизатор, так как легко меняет свою форму практически без изменения давления

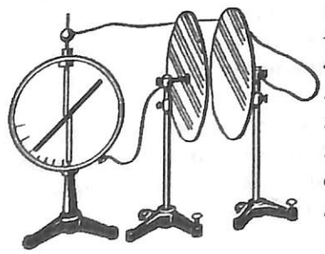


Газ является очень удобным рабочим телом в тепловых двигателях и двигателях, работающих на сжатом газе.

Сжатый воздух, действуя на поршень, открывает двери в автобусах, поездах метро и электричках, а на железнодорожном транспорте приводит в действие воздушные тормоза.



Электрические свойства газов



В пространстве между пластинами ток не возникает, хотя в нем и существует электрическое поле

Газы при давлениях, близких к атмосферному, легко сжимаются. Это связано с тем, что расстояния между его молекулами велико, по сравнению с размерами молекул, и поэтому силы молекулярного взаимодействия чрезвычайно малы.

Это приводит к тому, что даже при небольших изменениях давления объем газа заметно меняется. И наоборот, значительные изменения объема не приводят к большому изменению давления.

Поэтому газы способны совершать значительную работу на больших отрезках пути, толкая поршень в цилиндах различных двигателей. Газ, таким образом, оказывается самым удобным рабочим телом в многочисленных тепловых двигателях.

Большая сжимаемость газа позволяет запасать их в большом количестве в специальных баллонах, удобных для хранения и транспортировки. Сжатый природный газ удобно транспортировать по трубам на огромные расстояния.

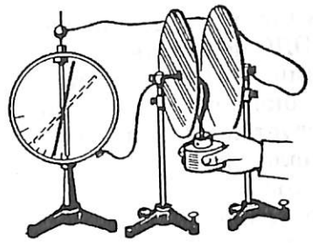
Часто в технических устройствах необходимо «избавиться» от газа (чаще всего, воздуха), который заполняет весь « предоставленный» ему объем, и получить в откачиваемом сосуде **вакуум** — такое состояние газа, в котором молекул остается так мало, что соударений между ними не происходит: молекулы сталкиваются только со стенками сосуда.

Высокий вакуум нужен в электронно-лучевых трубках и других электровакуумных приборах, ускорителях заряженных частиц, в специальных плавильных печах, предназначенных для получения особо чистых металлов и т. п.

Обычные поршневые насосы оказываются непригодными для таких целей, так как газы легко просачиваются между стенками сосуда и поршнем. Для откачки газа созданы специальные вакуумные (диффузионные и другие) насосы, позволяющие получать давления до 10^{-12} Па.

В привычном для человека интервале температур атомы или молекулы газа не ионизованы, то есть электрически нейтральны. Поэтому газы в отношении их **электрических свойств** относятся к диэлектрикам, то есть непроводникам электрического тока.

Однако при нагревании газа или облучении его ионизирующими излучениями он обнаруживает способность проводить электрический ток. Рассмотрим подробнее механизм протекания электрического тока в газах, или иначе, **газовый разряд**.



При нагревании воздуха электрометр разряжается, это свидетельствует о появлении свободных заряженных частиц в пространстве между пластинами

Действие ионизатора на газ

$h\nu \geq W_{\text{иониз}}$ $\quad \dfrac{mv^2}{2} \geq W_{\text{иониз}}$

ионизация

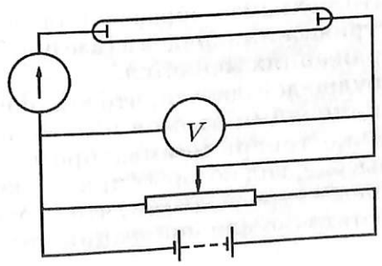
В газе образуются три вида свободных заряженных частиц:

— *электроны;*
— *положительные ионы;*
— *отрицательные ионы.*

Тепловое движение частиц приводит к рекомбинации заряженных частиц:

рекомбинация

Газ под действием ионизатора самопроизвольно приходит в состояние динамического равновесия: число пар ионов, образующихся в газе за 1 с, равно числу пар, рекомбинирующих за то же время. При этом устанавливается вполне определенная и постоянная концентрация свободных заряженных частиц в газе



Из атомной физики вам известно, что для того, чтобы ионизировать атом, ему нужно сообщить некоторую энергию — энергию ионизации. Каким будет механизм подвода энергии — несущественно. В результате **ионизации** атома образуются две заряженные частицы — электрон и положительно заряженный ион.

Эти частицы совершают тепловое движение. Оно может приводить к тому, что электрон может воссоединиться с положительным ионом и нейтрализовать его. Этот процесс носит название **рекомбинации**.

Иногда электрон может соединиться с нейтральным атомом. Тогда образуется отрицательно заряженный ион.

Все эти частицы — свободные, поэтому, если ионизировать газ, находящийся между двумя пластинами, на которые подано напряжение, то возникает упорядоченное движение электрически заряженных частиц, то есть электрический ток.

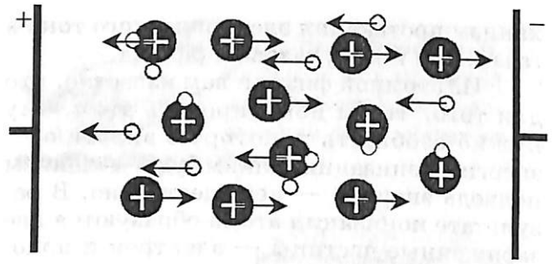
Таким образом, **ток в газе создается частицами трех видов:** положительно и отрицательно заряженными ионами и электронами.

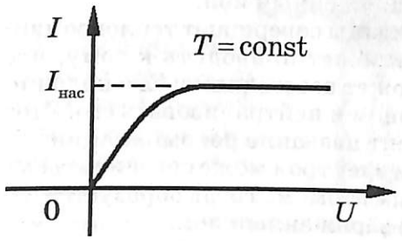
Если мощность ионизатора постоянна, то в заданном объеме газа каждую секунду образуется в среднем вполне определенное число пар ионов. По мере действия ионизатора число заряженных частиц в данном объеме увеличивается. Это приводит к тому, что процессы рекомбинации начинают происходить чаще. Наконец, устанавливается **динамическое равновесие между процессом ионизации и процессом рекомбинации:** число пар ионов, образующихся за 1 с, становится равным числу рекомбинирующих пар заряженных частиц за это же время. В этом случае число свободных заряженных частиц в данном объеме газа остается примерно постоянным.

В этом случае, сила тока, возникающая в газе, должна зависеть от напряжения. Вольтамперную характеристику, то есть зависимость силы тока от приложенного напряжения, можно получить, используя трубку, заполненную исследуемым газом, с двумя электродами, присоединенными к источнику тока.

Схема такой цепи изображена на рисунке.

Реостат, включенный как потенциометр, позволяет плавно менять напряжение

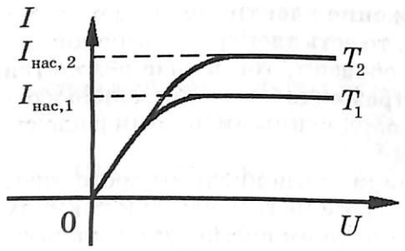




$$I = \frac{q}{t};$$

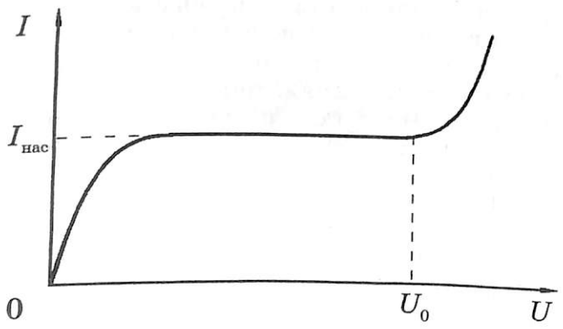
$$I_{нас} = \frac{Nq_1}{t};$$

Сила тока насыщения прямо пропорциональна числу пар ионов, образующихся за 1 с в газе под действием ионизатора



$$T_2 > T_1$$

Если разряд в газе прекращается сразу после того, как ионизатор перестает на него воздействовать, то разряд называется несамостоятельным.



$0 \le U \le U_0$ — *разряд несамостоятельный;*

$U > U_0$ — *разряд самостоятельный.*

Если разряд в газе происходит без ионизатора, то он называется самостоятельным

между электродами от нуля до значения, примерно равного ЭДС источника тока.

При увеличении напряжения между электродами сила тока в газе, на который постоянно воздействует ионизатор постоянной мощности, сначала увеличивается примерно пропорционально напряжению. Это можно объяснить тем, что при увеличении напряжения на электроны и ионы действует возрастающая сила со стороны электрического поля и средняя скорость движения этих частиц возрастает. Следовательно, число частиц (и перенесенный ими заряд), достигающих электроды в течение 1 с, увеличивается.

Затем сила тока начинает меняться медленнее, и при некотором значении напряжения она достигает насыщения, то есть перестает изменяться. Это означает, что все носители заряда, образовавшиеся в данной трубке за 1 с, успевают за это время достичь электродов.

Заметим, что таким образом, измеряя силу тока насыщения, можно определить число пар ионов, которые образуются данным ионизирующим источником за 1 с.

Опыт показывает, что если в любой момент времени при любом напряжении из указанного интервала убрать ионизатор, то газовый разряд прекращается. Следовательно, он является **несамостоятельным**.

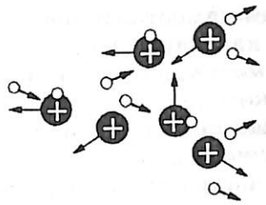
Это нетрудно объяснить, ведь носители заряда — электроны и ионы — образуются только благодаря действию ионизатора.

Однако, если продолжать увеличивать напряжение между электродами, то при некотором его значении сила тока в газе резко увеличивается: она может возрасти в сотни и даже тысячи раз.

Это свидетельствует о том, что в газе появились «дополнительные» носители заряда. Каков их источник? Ведь ионизатор, по-прежнему, производит вполне определенное число пар ионов.

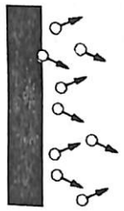
Уберем ионизатор и убедимся, что газовый разряд стал **самостоятельным**, то есть происходит и без ионизатора. Но это означает, что механизм образования свободных электрических зарядов в газе при больших напряжениях меняется.

Нетрудно догадаться, что это, по-прежнему, ионизация атомов или молекул газа, только теперь ионизатором стали электроны, энергия которых при движении в поле успевает так возрасти, что ее оказывается достаточно для ионизации молекул



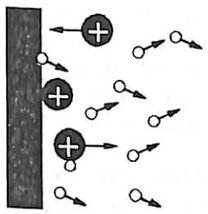
$$eU = eEd = \frac{m_e v^2}{2};$$

$$\frac{m_e v^2}{2} \ge W_{иониз}$$



Термоэлектронная эмиссия — процесс испарения электронов с поверхности металла происходит наиболее интенсивно, когда:

$$\frac{m_e \overline{v_e^2}}{2} \ge A_{вых}$$



При вторичной электронной эмиссии положительные ионы выбивают электроны из катода, а сами при этом превращаются в нейтральные атомы

газа при столкновениях. Этот механизм так и называется: **ионизация электронным ударом**.

Этот процесс носит лавинообразный характер, так как в результате ионизации образуются новые электроны, которые, в свою очередь, также производят ионизацию. Заметим, что при таких больших напряжениях лавинообразное нарастание числа электронов может начаться, даже если в газе имеется всего один электрон (вспомните действие счетчика Гейгера).

Но ионизация только электронным ударом не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Это связано с тем, что электроны, достигая анода, «выбывают из игры». Почему же в реальности газовый разряд может продолжаться достаточно долго?

Дело в том, что массивные положительные ионы, достигая катода, выбивают электроны с поверхности металла (вторичная электронная эмиссия). Кроме того, они передают катоду часть своей кинетической энергии. В результате катод сильно нагревается и из него начинают «испаряться» электроны: происходит явление **термоэлектронной эмиссии**.

В зависимости от свойств и состояния газа, от того, как расположены электроды, и от значения напряжения в газах могут возникать разные виды самостоятельного разряда: тлеющий, коронный, искровой и дуговой.

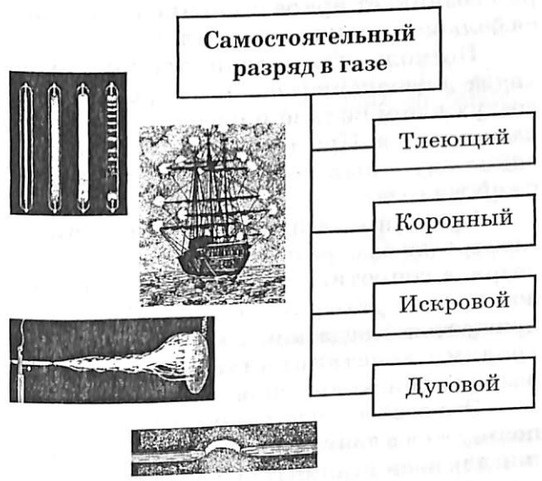
Тлеющий разряд можно наблюдать в длинной трубке при откачивании воздуха (или другого газа), то есть при низких давлениях газа в ней.

При этом разряде внутри трубки возникает свечение, практически полностью заполняющее трубку. Свечение испускают атомы, находящиеся в возбужденном состоянии и образующиеся при рекомбинации электронов и положительно заряженных ионов.

Тлеющий разряд используют в рекламных трубках и лампах дневного света, а также в газовых лазерах.

Коронный разряд в газе можно наблюдать в сильно неоднородных электрических полях . Обычно такой разряд наблюдается на остриях, проводах высоковольтных линий электропередач и т.п., а светящаяся область напоминает форму короны.

Напряженность электрического поля вблизи острия может достигать значений,

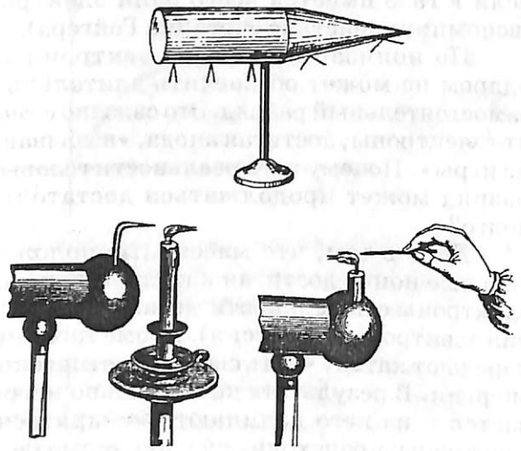


Тлеющий разряд:

1. Происходит при низком давлении газа в трубке (1... 2 мм рт. ст. и менее);
2. Напряженность электрического поля около 10^6 В/м и выше;
3. Основной механизм образования свободных зарядов — ионизация электронным ударом;
4. Свечение газа происходит при переходах атомов, образующихся при рекомбинации, из возбужденного состояния в основное.

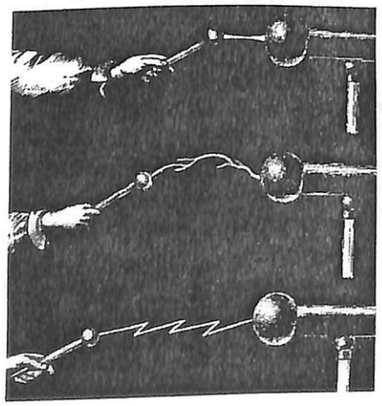
Коронный разряд

1. Происходит при атмосферном давлении;
2. Наблюдается в сильно неоднородных электрических полях напряженностью более 10^6 В/м;
3. Механизм образования свободных заряженный частиц — ионизация электронным ударом;
4. Свечение испускается атомами, образующимися при рекомбинации, и атомами, возбужденными электронным ударом.



Искровой разряд

1. Происходит при атмосферном давлении;
2. Наблюдается в электрических полях напряженностью более $3 \cdot 10^6$ В/м, сила тока может достигать десятков и сотен тысяч ампер;
3. Механизм образования свободных заряженный частиц — ионизация электронным ударом;
4. Свечение испускается атомами, возбуждаемыми электронным ударом;
5. Сопровождается выделением большого количества теплоты за очень малые промежутки времени, что приводит к возникновению звуковых волн.



при которых возникает самостоятельный разряд в газе. Но так как напряженность поля быстро падает по мере удаления от острия, то и область, в которой происходит ионизация и рекомбинация молекул и атомов газа, весьма ограниченна.

Коронный разряд часто можно наблюдать во время грозы, когда заряженное грозовое облако индуцирует на поверхности Земли под собой электрический заряд противоположного знака. Особенно большой заряд при этом скапливается на остриях, выступающих частях высоко поднятых предметов. С давних времен моряки называли это свечение «огнями святого Эльма».

Практического применения коронный разряд не имеет, напротив, его пытаются предотвратить, так как при наличии выступающих или очень тонких проводов в цепях с высоким напряжением коронный разряд приводит к утечкам электроэнергии.

Искровой разряд возникает в сухом воздухе при атмосферном давлении, когда между электродами напряженность электрического поля достигает значения около $3 \cdot 10^6$ В/м. Искровой разряд приводит к пробою воздушного промежутка, при котором возникает яркое свечение и выделяется большое количество теплоты.

Поскольку выделение теплоты происходит в небольшой области пространства, воздух в нем сильно нагревается и быстро расширяется. При этом происходит образование звуковых волн, сопровождающих разряд в газе.

Сразу после пробоя напряжение на электродах быстро падает, так как в момент разряда сопротивление газа в газоразрядном промежутке резко падает. Разряд прекращается. Когда напряжение между электродами восстанавливается, искровой разряд происходит снова.

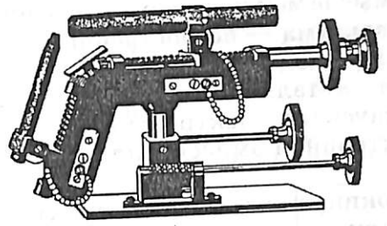
Эта особенность искрового разряда используется в двигателях внутреннего сгорания для поджигания горючей смеси, а также для электроискровой обработки металлов.

Примером искрового разряда в природе является молния, которая может возникать или между двумя облаками, или между облаком и Землей. Сила тока в молнии может достигать огромных значений — до 500000 А, а продолжительность разряда обычно не превышает миллионной доли секунды.

Самостоятельный разряд в газе при атмосферном давлении можно получить и

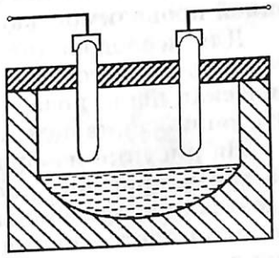
Дуговой разряд

1. Происходит при атмосферном давлении;
2. Наблюдается при значениях напряжения около 30 ... 50 В;
3. Механизм образования свободных заряженный частиц — термоэлектронная эмиссия и вторичная эмиссия электронов;
4. Свечение испускается атомами сильно нагретого газа (4000К ... 6000 К).



В угольном стержне, являющимся катодом, при горении электрической дуги образуется кратер из-за сильного испарения вещества.

Разрез электрической плавильной печи, использующей дуговой электрический разряд



при сравнительно небольшом напряжении в 30... 50 В. Для этого в качестве электродов нужно использовать специальные угольные стержни и привести их в соприкосновение.

Так как графит является проводником, то в цепи появляется значительный ток. В месте соприкосновения электродов сопротивление довольно велико, поэтому здесь и выделяется наибольшее количество теплоты. Концы угольных стержней раскаляются и начинается термоэлектронная эмиссия. Теперь угли можно раздвинуть: в промежутке между ними будет наблюдаться **дуговой разряд** — столб ярко светящегося газа.

Высокая температура катода при горении дуги поддерживается бомбардирующими катод положительными ионами. В кратере дуги, то есть углублении которое образуется в катоде из-за интенсивного испарения вещества,температура может достигать 4000 К, а при повышении давления газа до 2 атмосфер и до 7000 К, то есть становится выше температуры на поверхности Солнца.

Это определило практические применения дугового разряда. Во-первых, его используют в качестве источника света в прожекторах, проекционных аппаратах и кинопроекторах, маяках и т.п.

Во-вторых, в электрометаллургии дуговой разряд служит источником теплоты в электропечах. В-третьих, электрическую дугу используют для электросварки металлов, которая широко применяется в машиностроении, при прокладке трубопроводов, строительстве зданий, мостов и других сооружений.

Вакуум. Электрический ток в вакууме

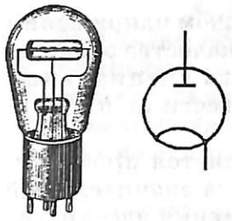
Вакуум

1. Состояние чрезвычайно разреженного газа, в котором длина свободного пробега атомов не меньше размеров сосуда;
2. Давление газа $p < 10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па;
3. Тепловые свойства: не передает тепло путем теплопроводности и конвекции, но является прозрачным для излучения;
4. Электрические свойства отсутствуют, возможен механизм несобственной электронной проводимости;
5. Магнитные свойства отсутствуют.

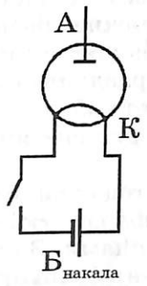
Мы уже говорили о том, что при откачивании воздуха из сосуда концентрация молекул газа уменьшается, а вместе с ней уменьшается и давление газа при той же температуре. Это приводит также к тому, что столкновения между молекулами становятся относительно редкими, и при некотором значении давления практически прекращаются.

В этом случае, если молекулы испытывают соударения только со стенками сосуда, говорят, что в сосуде создан **вакуум**.

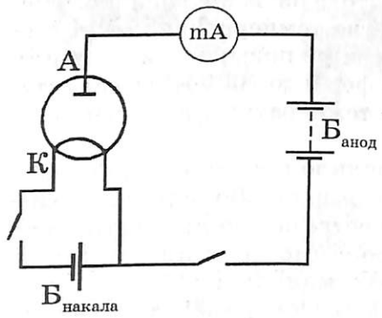
Конечно,такое состояние газа обладает свойствами, отличающими его от обычного газа. Например, вакуум не обладает теплопроводностью и в нем невозможна передача тепла путем конвекции. В нем



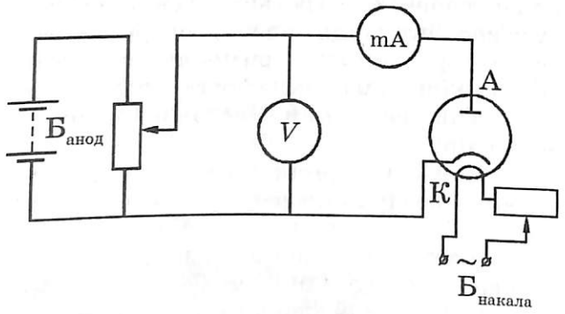
Вакуумный диод и его условное обозначение

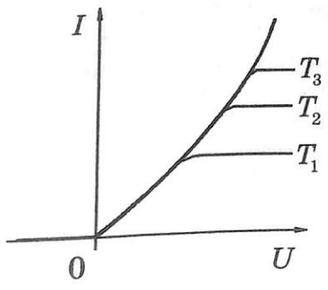


Если катод вакуумного диода подключить к батарее, то он начнет нагреваться и внутрь баллона диода начнут «испаряться» электроны. Эти электроны — свободные, следовательно, могут создать электрический ток.



Если в диоде создать электрическое поле, подавая на анод положительный потенциал, то в цепи анода возникнет электрический ток.





Вольтамперные характеристики вакуумного диода с металлическим катодом для разных температур катода:

$T_1 < T_2 < T_3$

невозможно распространение звуковых волн. Зато он практически не поглощает излучения и не препятствует движению элементарных частиц.

Вакуум не обладает электрическими свойствами, так как в нем нет свободных заряженных частиц. Но создать ток в вакууме можно, если поместить внутрь сосуда с вакуумом, источник свободных заряженных частиц (чаще всего электронов). В этом смысле можно говорить, что **проводимость вакуума — несобственная**.

Таким источником электронов могут служить металлические электроды, которые испускают электроны в процессе термоэлектронной эмиссии или при фотоэффекте.

Покинувшие электрод электроны создают ток, если в сосуде имеется электрическое поле. Для этого потребуется другой электрод. Система из двух электродов, помещенных в сосуд, в котором создан вакуум, называется **вакуумным диодом**.

В таком устройстве ток может течь только в одном направлении: от электрода, который является источником электронов (катод) к другому электроду — аноду. Поэтому говорят, что **диод обладает односторонней проводимостью**.

Для исследования тока в вакуумном диоде используется уже знакомая вам электрическая цепь, позволяющая плавно менять напряжение между анодом и катодом.

На рисунке изображена вольтамперная характеристика диода. Когда на анод подается положительный потенциал, в диоде возникает электрический ток. Сила тока зависит от значения приложенного между анодом и катодом напряжения: при увеличении напряжения сила тока увеличивается.

При данной температуре катода (или при данном световом потоке, падающем на фотокатод) число электронов, покидающих поверхность металла за 1 с, остается примерно постоянным, поэтому при увеличении напряжения сила тока растет до тех пор, пока не достигнет насыщения. Это значение силы тока соответствует такому значению напряжения, при котором все образовавшиеся за 1 с электроны достигают анода.

Повышая температуру (или освещенность) катода можно изменять значение силы тока насыщения.

До открытия удивительных свойств

Свойства электронных пучков:

1. Обладают энергией. Падая на тела, они вызывают их нагревание;

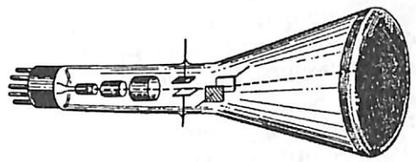
2. При резком торможении электронного пучка , например, при ударе о массивные металлические пластины (вольфрам, платина) происходит излучение рентгеновских лучей;

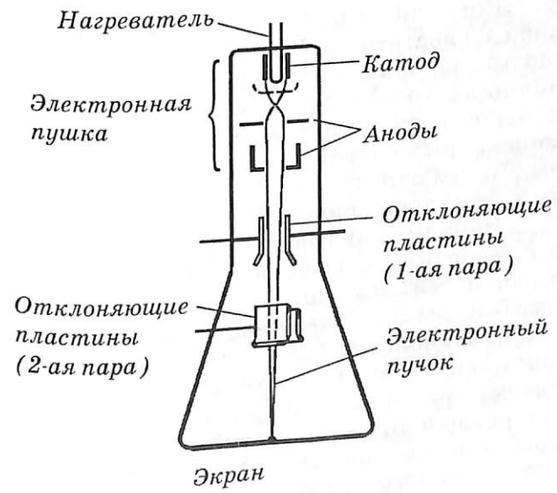
3. Многие материалы (люминофоры) способны светиться под действием электронного пучка, преобразуя в свет около 25% энергии электронного пучка;

4. Отклоняются электрическим полем;

5. Отклоняются магнитным полем;

6. Малоинерционны.





полупроводников в радиотехнике пользовались исключительно вакуумными электронными лампами. Простейшей из них был диод. Увеличивая число электродов, можно было более тонко управлять движением электронов. Однако, в настоящее время подобные устройства уступают место более удобным, компактным, не требующим дополнительных затрат энергии на питание цепей накаливания, полупроводниковым приборам. И только один вакуумный прибор — электронно-лучевая трубка,по-прежнему, широко используется в электронных устройствах.

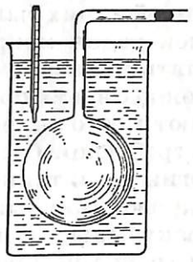
Электронно-лучевая трубка представляет собой вакуумный баллон, расширяющийся с одной стороны и покрытый люминофором (экран). В узкой части трубки помещен источник электронов и система управления электронным пучком.

В электронно-лучевой трубке используется явление термоэлектронной эмиссии для получения свободных электронов. При помощи анода, в котором проделано отверстие, электроны разгоняются электрическим полем, и те из них, которые пролетели через отверстие, образуют электронный пучок. Энергией электронов в пучке, их числом и диаметром пучка можно управлять, помещая между катодом и анодом дополнительные электроды. Так получают «электронную пушку» — устройство, на выходе из которого получается узкий пучок электронов, движущихся в определенном направлении.

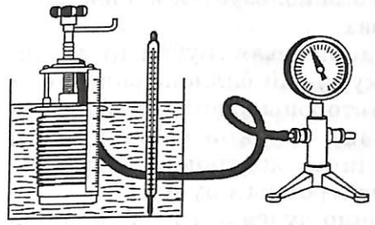
После электронной пушки пучок электронов проходит последовательно через две пары управляющих пластин, подобных плоскому конденсатору. Если электрического поля между пластинами нет, то пучок попадает в центр экрана, где и образует светящуюся точку.

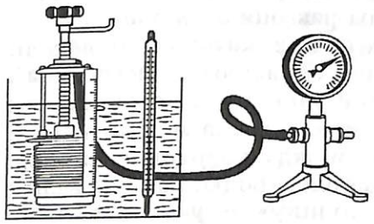
При подаче на пластины разности потенциалов положение точки изменяется: вертикально расположенные пластины управляют отклонением пучка в горизонтальном направлении, а горизонтальные — в вертикальном.Одновременное использование пластин позволяет переместить светящуюся точку в любое место экрана.

В кинескопах — электронно-лучевых трубках, используемых в телевизоре или в дисплее компьютера, управление электронным пучком осуществляется с помощью магнитного поля катушек, надетых на горловину трубки.



В широком диапазоне температур и давлений реальные газы подчиняются законам идеального газа, которые первоначально и были установлены опытным путем.



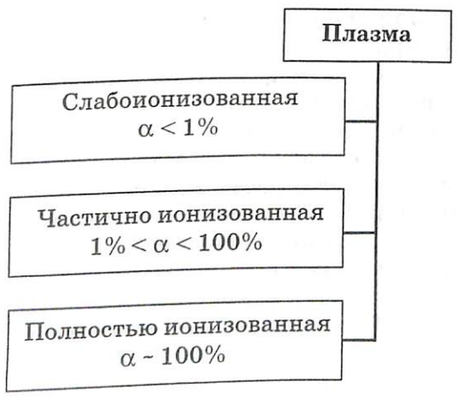


Плазма — четвертое состояние вещества

$\alpha = \frac{n_{\pm}}{n}$, *степень ионизации,*

$n_{\pm}$ — *концентрация заряженных частиц,*

n — *общая концентрация частиц.*



Рассмотрим теперь **тепловые свойства** газов. Так как в широком диапазоне давлений и температур реальные газы проявляют свойства идеального, то можно просто еще раз перечислить изученные подробно тепловые свойства этого состояния вещества. Газы, приведенные в контакт с нагревателем, способны к теплопередаче всеми известными способами. Газы передают тепло путем теплопроводности, конвекции и излучения.

При нагревании и охлаждении объем газа и его внутренняя энергия могут изменяться по-разному, в зависимости от вида процесса. Связь термодинамических параметров определяет уравнение Менделеева-Клапейрона.

Удельная теплоемкость газа зависит от вида процесса, в котором газ обменивается теплотой с нагревателем или холодильником. А его внутренняя энергия может быть подсчитана по аналогичной формуле, выведенной для идеального газа, но в каждом конкретном случае нужно будет учитывать, является газ одноатомным или многоатомным, так как это влияет на значение коэффициента пропорциональности в данной формуле.

Отличие в тепловых свойствах реального газа от идеального наблюдается при таких значениях температур и давлений, когда атомы газа начинают, во-первых, ионизоваться при столкновениях и, во-вторых, при агрегатном превращении газа в жидкость.

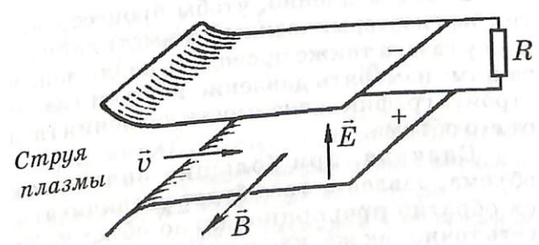
Рассмотрим эти процессы подробнее.

При нагревании газа число ионизованных атомов увеличивается.

Когда число ионизованных атомов становится достаточно большим, говорят, что газ превратился в плазму — частично или полностью ионизованный газ, в котором плотность положительно и отрицательно заряженных частиц практически одинаковы. Таким образом, плазма — электрически нейтральная система.

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны различными излучениями и бомбардировкой газа быстрыми заряженными частицами.

В зависимости от энергии частиц различают плазму высокотемпературную и плазму низкотемпературную. Такое условное разделение важно особенно в связи с проблемой осуществления управляемого термоядерного синтеза.



Плазма обладает рядом специфических свойств. Рассмотрим их.

Плазма электрически нейтральна в любой выделенной в ней области. Это связано с тем, что из-за большой подвижности заряженные частицы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Даже случайные скопления зарядов одного знака в какой-то области плазмы быстро ликвидируются. Возникающие от таких скоплений электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока нейтральность не восстановится и электрическое поле не станет равным нулю.

Между частицами в плазме действуют кулоновские силы, которые сравнительно слабо убывают с расстоянием. Поэтому каждая частица в плазме взаимодействует одновременно с большим числом частиц. Благодаря этому, кроме теплового движения в плазме наблюдаются разнообразные упорядоченные «коллективные» движения частиц, приводящие к колебательным и волновым процессам.

Полностью ионизованная плазма обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью и малой вязкостью.

Электропроводность такой плазмы значительно превосходит даже электропроводность серебра, поэтому во многих случаях ее можно рассматривать как идеальный проводник или сверхпроводник.

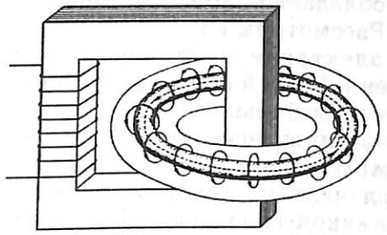
По мере изучения ее свойств, плазма находит все более широкое применение в технике.

Низкотемпературная плазма ($T \approx 10^3$ К) находит применение в газоразрядных источниках света — рекламных трубках и лампах дневного света. Для того, чтобы излучение ламп дневного света было близко по составу к дневному свету, внутренние части баллона покрывают специальным люминофором.

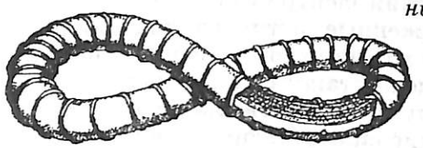
Газоразрядная плазма используется в газовых лазерах.

Низкотемпературная плазма применяется в магнитогидродинамических генераторах (МГД-генераторах), действие которых основано на разделении в магнитном поле движущейся струи плазмы на две разноименно заряженных части.

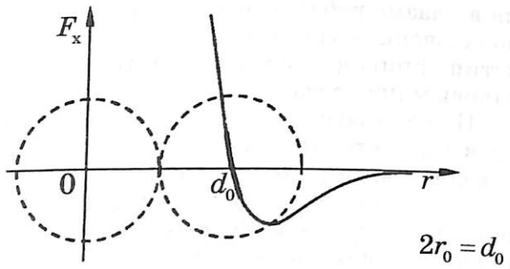
Эти пучки направляются на электроды, которые приобретают заряды противоположных знаков. В результате этого между электродами возникает разность потенциалов. Напряжение прямо с элект-

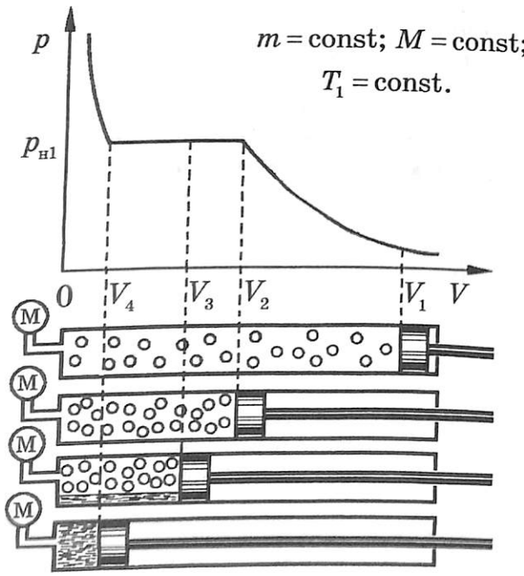


Для удержания плазмы используют тороидальные магнитные камеры



Агрегатные превращения реального газа





родов подается во внешнюю цепь.

Если через плазму, находящуюся в магнитном поле пропустить электрический ток, то поле будет ускорять плазменную струю. На этом основано действие плазменного реактивного двигателя.

Мощные струи низкотемпературной плазмы, созданные в плазмотроне, применяются для резки и сварки металлов, бурения скважин в особо твердых породах и т.п.

Многие химические процессы, которые не могут происходить в обычных условиях, успешно протекают в плазменных струях.

Но наиболее перспективным представляется применение высокотемпературной плазмы в установках для управляемого термоядерного синтеза.

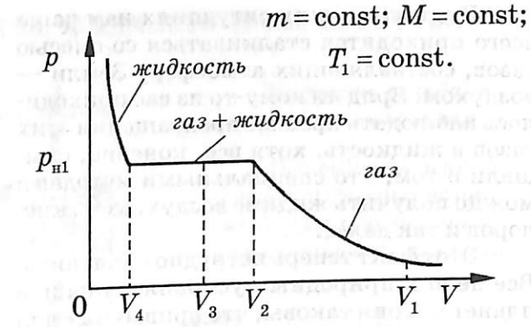
Как уже говорилось ранее, наиболее ярким отличием реального газа от идеального является его способность переходить в другие агрегатные состояния вещества — жидкое и твердое. Рассмотрим сначала процесс превращения реального газа в жидкость на примере водяного пара.

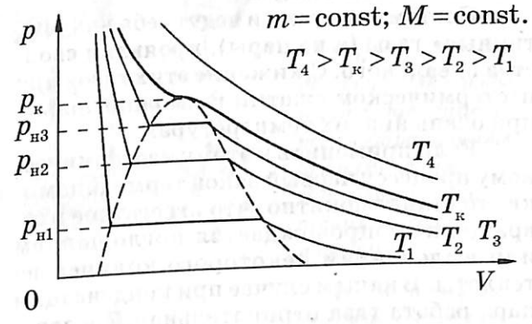
На основе молекулярно-кинетической теории можно, в общих чертах, предложить опыт, который следует провести, чтобы наблюдать данный процесс. Действительно, если сжимать реальный газ изотермически, то есть без изменения внутренней энергии, то можно сблизить молекулы газа настолько, что между ними сначала возникнут силы молекулярного притяжения. Затем, при дальнейшем уменьшении расстояния между частицами, эти силы будут увеличиваться. Наконец, на некотором расстоянии между частицами силы молекулярного взаимодействия смогут удерживать соседние атомы друг около друга. Газ начнет превращаться в жидкость.

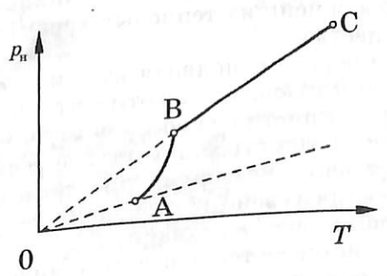
На рисунке изображен длинный цилиндр со стеклянными стенками, заполненный водяным паром. Манометр позволяет измерять давление пара.

Будем медленно, чтобы процесс сжатия был изотермическим, сжимать данную массу газа, а также проводить наблюдения за ним: измерять давление и объем газа и строить график зависимости давления газа от его объема.

Сначала, при больших значениях объема, давление газа будет увеличиваться обратно пропорционально объему. То есть точно так же, как и в случае идеального газа. Затем, начиная с некоторого значения объема, давление перестает изменяться и при дальнейшем сжатии газа на стенках цилиндра появляются капли жидкости.







На участке AB изменение давления насыщенного пара определяют два фактора: изменение температуры и изменение массы пара за счет агрегатного превращения пара в жидкость или жидкости в пар.

Дальнейшее уменьшение объема газа не приводит к повышению давления. Оно остается постоянным, но количество жидкости в цилиндре увеличивается.

Если приостановить движение поршня, то количество жидкости в сосуде перестанет меняться. Это означает, что в этих состояниях жидкость и ее пар находятся в термодинамическом равновесии.

Если продолжить уменьшение объема, то количество жидкости снова начнет увеличиваться. И это происходит до тех пор, пока сосуд не будет заполнен жидкостью.

Теперь при изменении ее объема давление резко возрастает, подтверждая известный факт, что жидкости практически несжимаемы.

Этот опыт позволяет обнаружить интересный факт: пока при неизменной температуре и уменьшении объема происходит превращение пара в жидкость, давление пара, находящегося в равновесии со своей жидкостью, остается постоянным.

Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным паром. Следовательно, давление насыщенного пара при данной температуре является характеристикой данного вещества. Оно не зависит от объема газа.

Если повторить этот опыт при других, более высоких значениях температуры, то обнаружатся следующие закономерности.

Во-первых, все изотермы реального газа вплоть до некоторой температуры $T_к$ имеют горизонтальный участок, соответствующий агрегатному превращению пара в жидкость. При повышении температуры длина горизонтального участка уменьшается.

Во-вторых, конденсация пара в жидкость при более высоких температурах начинается при меньших значениях объема газа.

В-третьих, давление насыщенного пара увеличивается с ростом температуры.

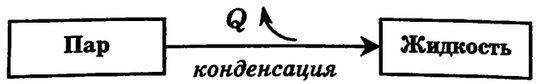
В-четвертых, процесс конденсации заканчивается при большем значении объема. Это согласуется с тем фактом, что данная масса жидкости имеет тем больший объем, чем выше ее температура.

Наконец, в-пятых, при температурах выше $T_к$ реальный газ ведет себя как идеальный во всем интервале изменения объема и никогда не превращается в жидкость.

Состав воздуха

Газ	Объемная доля,%	Критическая температура	
		К	°С
Азот	78,09	126	–147
Кислород	20,95	154	–118
Аргон	0,93	150	–122
Углекислый газ	0,03	304	31
Неон	0,0018	44	–229
Гелий	0,00053	5,3	–267,9
Водород	0,00005	33,3	–239,9
Метан	0,00015	191	–82

$$T = \text{const}; \quad \Delta T = 0; \quad \Delta U = 0.$$
$$V_2 < V_1; \quad \Delta V < 0; \quad A' < 0.$$
$$Q = \Delta U + A' = A' < 0.$$



$$T = \text{const}; \quad \Delta T = 0; \quad \Delta U = 0.$$
$$V_2 > V_1; \quad \Delta V > 0; \quad A' > 0.$$
$$Q = \Delta U + A' = A' > 0.$$

Газ	Удельная теплоемкость, кДж/(кг К)		Удельная теплота парообраз., кДж/кг
	c_p	c_v	
Азот	1,05	0,75	199
Кислород	0,91	0,65	213
Аргон	0,52	0,32	163
Углекислый газ	0,84	0,65	573
Гелий	5,30	3,18	19,5
Водород	14,27	10,13	454
Метан	2,48	1,70	511

В практических ситуациях нам чаще всего приходится сталкиваться со смесью газов, составляющих атмосферу Земли — воздухом. Вряд ли кому-то из вас приходилось наблюдать процесс превращения этих газов в жидкость, хотя все, конечно, слышали о том, что специальными методами можно получить жидкие воздух, азот, кислород и так далее.

Этот факт теперь нетрудно объяснить. Все дело в природных условия на нашей планете. А они таковы, что привычные для нас температуры оказывается значительно выше критической температуры каждого из компонентов воздуха.

Поэтому эти газы и ведут себя как «истинные» газы (а не пары), проявляя свойства идеального. Сжижение этих газов при изотермическом сжатии возможно только при очень низких температурах.

Если применить к этому изотермическому процессу первый закон термодинамики, то станет понятно, что агрегатное превращение сопровождается поглощением или выделением некоторого количества теплоты. В нашем случае при конденсации пара работа газа отрицательная, следовательно, этот процесс сопровождается выделением некоторого количества теплоты в окружающую среду.

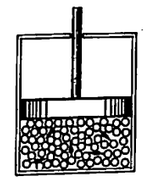
Этот вывод также подтверждается опытом, о чем вам хорошо известно из курса физики основной школы.

Количество теплоты, которое выделяется при конденсации 1 кг пара в жидкость при постоянной температуре, называется **удельной теплотой парообразования** (испарения). Это еще одна (кроме удельной теплоемкости газа при постоянном давлении и удельной теплоемкости при постоянном объеме) из важнейших тепловых характеристик вещества.

Таким образом, подводя итог изучению реальных газов, можно отметить, что молекулярно-кинетическое рассмотрение процессов с учетом строения атомов и законов сохранения позволяет предсказать многие явления и свойства реального газа, которые наблюдаются в жизни.

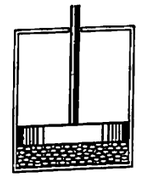
Все свойства — тепловые, механические и электрические — одновременно присущи газам. Каждое из этих свойств проявляется ими, в той или иной мере, в любом процессе, происходящим с газом. Но, выступая на первый план, каждое из них становится определяющим в «своих» явлениях.

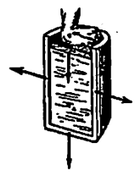
§ 39. ЖИДКОСТИ И ИХ СВОЙСТВА



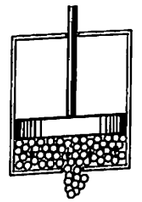
Жидкости обладают собственным объемом.

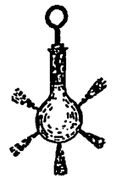
Плотность жидкостей при обычных условиях больше плотности газов в сотни и тысячи раз.





Жидкости практически не сжимаемы.

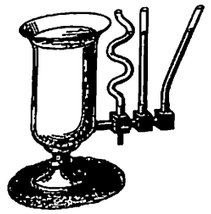




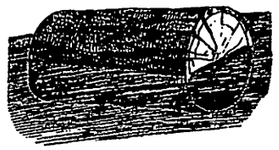
Жидкости передают производимое на них давление по всем направлениям без изменения.
В условиях тяготения жидкости текучи.

Из-за текучести жидкость принимает форму сосуда, в котором находится.

Собственная форма жидкости — шар — на Земле может наблюдаться только для очень малых масс жидкости (капли росы).



В сообщающихся сосудах свободная поверхность однородной жидкости лежит в одной горизонтальной плоскости.



В покоящейся жидкости в условиях тяготения давление в жидкости растет по мере погружения, это обусловливает наличие силы Архимеда.

Давление в движущейся жидкости подчиняется закону Бернулли.

Рассмотрим теперь основные свойства жидкого состояния вещества.

В молекулярно-кинетической теории идеальные жидкости представляют собой такое состояние, в котором структурные частицы находятся в непрерывном хаотическом (тепловом) движении и расположены практически вплотную друг к другу. Таким образом между частицами вещества в жидкостях действуют силы молекулярного взаимодействия, которые удерживают молекулы и не дают им «разлететься» в разные стороны. Поэтому жидкости, в отличие от газов, обладают собственным объемом.

Поскольку частицы жидкости внутри нее не могут значительно удаляться друг от друга, то нужно пояснить, каким является характер их движения. Частицы совершают хаотическое движение вблизи некоторого положения равновесия, изредка меняя своих соседей и переходя в новое состояние равновесия.

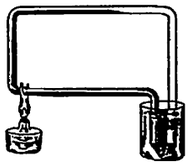
Время «оседлой жизни», например, молекул воды, то есть время нахождения вблизи некоторого положения равновесия по теоретическим расчетам составляет около 10^{-11} с. За это время молекула успевает совершить сотни колебательных движений.

Перескоки молекул происходят случайным образом, однако, если на жидкость действует сила, например, сила тяжести, то перескоки происходят преимущественно в направлении действия силы. Этим можно объяснить важное свойство жидкости — ее текучесть.

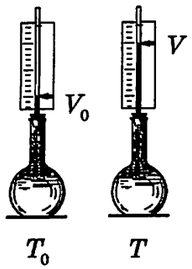
Как уже говорилось, количественная теория жидкостей пока не создана, хотя на качественном уровне молекулярно-кинетическая теория может объяснить большинство явлений, происходящих с жидкостями.

Заметим при этом, что выводы МКТ относительно связи средней кинетической энергии движения частиц жидкости и ее температуры остаются в силе, точно также как и первый и второй законы термодинамики, которыми мы будем пользоваться при объяснении некоторых свойств жидкостей.

Основные **механические свойства** жидкостей перечислены в левом столбце. Объяснение этих свойств на основе молекулярно-кинетических представлений о строении жидкостей не будет для вас сложным. Поэтому мы не будем останавливаться на них более подробно, а сразу перейдем к об-



В жидкостях можно наблюдать все виды теплопередачи, но в обычных условиях наиболее эффективным видом является конвекция.



$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha \Delta T;$$

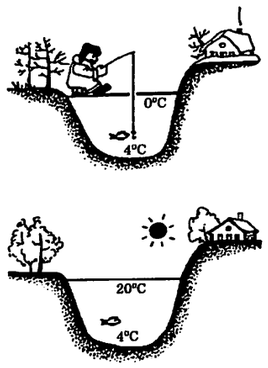
$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha \Delta T;$$

$$V = V_0(1 + \alpha \Delta T).$$

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T};$$

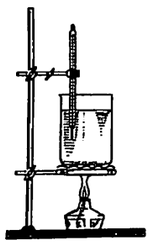
$$[\alpha] = \left[\frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}\right] = \text{К}^{-1}$$

Жидкость	α, 10^{-6} К$^{-1}$
Вода	208
Глицерин	505
Анилин	858
Бензин	1100
Ацетон	1487



Зависимость плотности воды от температуры

t°C	ρ, кг/м^3
0	999,84
1	999,90
2	999,94
3	999,96
4	999,97
5	999,96
6	999,94
7	999,90



$$Q = \Delta U + A'; \quad A' \approx 0;$$

$$Q = \Delta U;$$

$$Q = cm\Delta T;$$

$$c = \frac{Q}{m\Delta T};$$

$$[c] = \left[\frac{Q}{m\Delta T}\right] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

суждению наиболее важных для человека тепловых свойств жидкостей.

Чтобы изменить температуру жидкости, ее (а точнее закрытый сосуд, в котором она находится) нужно привести в контакт с нагревателем или холодильником. В первом случае жидкость будет нагреваться, во втором — охлаждаться до тех пор, пока не придет в состояние теплового равновесия с ними.

Передача теплоты в жидкости происходит путем теплопроводности, конвекции и излучения.

При изменении температуры объем жидкости изменяется. Это связано с тем, что средняя кинетическая энергия молекул жидкости при повышении температуры увеличивается, амплитуда колебаний вблизи положения равновесия растет, и среднее расстояние между молекулами вследствие этого увеличивается.

В значительном интервале температур изменение объема большинства жидкостей прямо пропорционально изменению температуры и начальному объему жидкости. Коэффициент пропорциональности называется **коэффициентом объемного расширения** и является тепловой характеристикой данной жидкости.

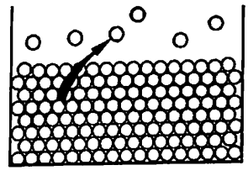
Изменение объема жидкости при нагревании обычно происходит при постоянном давлении и оказывается значительно меньше, чем у газа. Поэтому в большинстве случаев можно считать, что работа жидкости при расширении практически равна нулю. Тогда все количество теплоты, полученное или отданное жидкостью при теплообмене, равно изменению внутренней энергии жидкости.

Количество теплоты можно рассчитать по известной формуле. **Удельная теплоемкость** жидкости — ее важнейшая тепловая характеристика.

Отличительной особенностью жидкости является наличие у нее свободной поверхности. **Свободная поверхность** — это граница раздела жидкости и находящегося над ней газа (обычно воздуха, в котором обязательно находятся пары этой жидкости).

Состояние молекул жидкости, находящихся на поверхности жидкости, отличается от состояния таких же молекул внутри жидкости.

Это обусловливает ряд новых явлений, которых мы не наблюдали при изучении газа: это процессы испарения и парообразования и явление поверхностного натяжения. Рассмотрим их более детально.



Испарение жидкости из открытого сосуда в воздухе происходит до тех пор, пока вся жидкость не испарится.

Испарение жидкости:

1. Происходит при любой температуре;

2. Скорость процесса испарения зависит от

— рода жидкости;

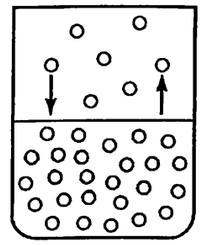
— площади свободной поверхности;

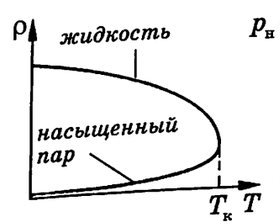
— температуры жидкости;

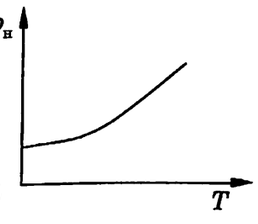
— наличия «ветра», предотвращающего процесс конденсации пара в жидкость;

3. Испаряющаяся из открытого сосуда жидкость не находится в равновесии с собственным паром и окружающей средой, так как ее температура всегда ниже температуры окружающей среды из-за постоянной «потери» наиболее энергичных молекул.

4. При испарении жидкости в закрытом сосуде устанавливается динамическое равновесие между жидкостью и ее паром. Водяной пар в закрытом сосуде — насыщенный. Его давление не зависит от объема, а определяется для данной жидкости только ее температурой.







Ненасыщенный пар

1. Параметры: p, ρ;
2. $p(T, V)$; ρ (T, V);
3. $p = nkT$;

Насыщенный пар

1. Параметры: $p_н$, $\rho_н$;
2. $p_н(T)$; $\rho_н(T)$;
3. $p_н = nkT$; $n = n(T)$.

Относительная влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{p}{p_н} \cdot 100\%;$$

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_н} \cdot 100\%;$$

При любых температурах со свободной поверхности жидкости происходит ее **испарение** — те молекулы, кинетическая энергия которых достаточно велика (чтобы преодолеть притяжение других молекул), находящиеся вблизи свободной поверхности и движущиеся в сторону газа, покидают поверхность жидкости и образуют пар.

Число молекул, покидающих жидкость при испарении, зависит от площади свободной поверхности, температуры жидкости и рода жидкости.

Молекулы пара, двигаясь хаотически вблизи свободной поверхности жидкости, могут возвращаться назад в жидкость, то есть конденсироваться. Таким образом, обычно оба процесса: **испарение и конденсация происходят одновременно**. Однако скорость этих процессов может различной.

Если за единицу времени число молекул, покидающих жидкость, больше числа молекул возвращающихся в нее, то масса жидкости постепенно уменьшается, а пары жидкости называются ненасыщенными.

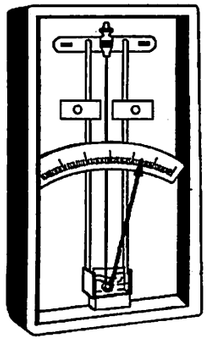
Если наступает динамическое равновесие пара и его жидкости, то масса жидкости и масса пара в выделенном объеме остаются неизменными.

Если за единицу времени число молекул возвращающихся в жидкость больше, чем покидающих ее, то масса жидкости увеличивается.

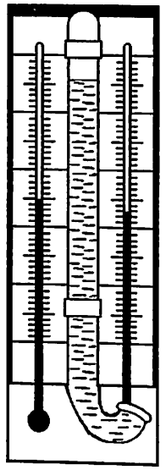
Поскольку значительную долю поверхности Земли покрывают воды Мирового океана, то в воздухе всегда содержится некоторое количество водяных паров. **Состояние водяных паров в атмосфере можно характеризовать плотностью и парциальным давлением.**

Обычно, значения этих величин принято сравнивать с максимально возможными при данной температуре — то есть с плотностью и давлением насыщенного пара при данной температуре.

Физическая величина, численно равная отношению плотности пара (или его парциального давления) к плотности (или парциальному давлению) насыщенного пара при данной температуре, выраженная в процентах, называется **относительной влажностью воздуха**. Относительная влажность показывает, как близко состояние водяных паров в атмосфере в данный момент времени к состоянию насыщения.

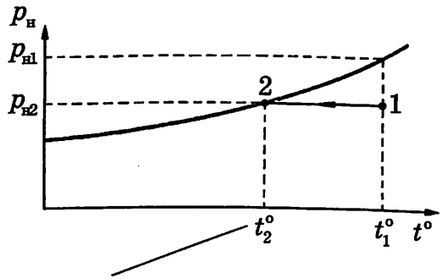


Волосной гигрометр



Психрометр

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С						
	0	1	2	3	4	5	6
	Относительная влажность, %						
18	100	91	82	74	65	56	49
20	100	91	83	74	66	59	51
22	100	92	83	76	68	61	54



Точка росы — температура, при которой водяной пар, находящийся в данный момент в атмосфере, становится насыщенным.

$$1 \to 2: \quad p_1 = \text{const}; \quad t_1^\circ > t_2^\circ;$$

$$\text{при } t^\circ = t_2^\circ \qquad p_{н2} = p_1;$$

$$\varphi = \frac{p_1}{p_{н1}} \cdot 100\% = \frac{p_{н2}}{p_{н1}} \cdot 100\%.$$

Зная точку росы, можно определить парциальное давление водяного пара, содержащегося в настоящий момент времени в атмосфере.

Относительная влажность воздуха может быть измерена или волосным **гигрометром** или **психрометром**. Устройство волосного гигрометра основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса удлиняться при увеличении относительной влажности воздуха.

В принципе действия психрометра используется тот факт, что испаряющаяся жидкость находится в состоянии динамического равновесия только со своим насыщенным паром. Поэтому, когда пар в воздухе не является насыщенным, скорость испарения жидкости больше скорости ее конденсации. Следовательно, жидкость покидают наиболее «энергичные» молекулы и распределение молекул жидкости по скоростям смещается в сторону меньших температур. Этот факт вам хорошо известен: испаряющаяся жидкость имеет более низкую температуру, чем окружающий ее воздух.

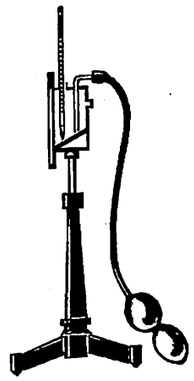
Чем больше скорость испарения (а это бывает, когда пар далек от насыщения), тем ниже температура жидкости.

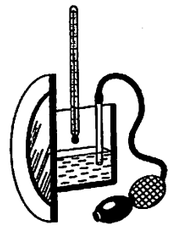
Следовательно, для измерения относительной влажности воздуха достаточно измерить его температуру и сравнить ее с температурой испаряющейся жидкости.

Устройство психрометра приведено на рисунке, а психрометрическая таблица содержит необходимую информацию для определения относительной влажности воздуха по показаниям «сухого» и «влажного» термометров.

Если воздух, содержащий водяные пары, начать охлаждать при постоянном давлении, то его относительная влажность повышается. Это происходит потому, что парциальное давление пара водяного пара не меняется (ведь давление остается постоянным), а давление насыщенного пара при уменьшении температуры уменьшается.

Когда температура достигнет такого значения, при котором давление пара в данный момент содержащегося в воздухе, становится равным давлению насыщенного пара при этой температуре, водяные пары станут насыщенными. В этом случае на частицах пыли, ионах и других «центрах» конденсации образуется туман или выпадает роса: насыщенный пар превращается в жидкость. Поэтому температура, при которой данный водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**. Поскольку измерение температуры является





Конденсационный гигрометр — прибор, позволяющий определять точку росы.

t°C	p, кПа	ρ, кг/м³
10	1,23	9,41
12	1,40	10,67
14	1,60	12,08
16	1,82	13,65
18	2,06	15,39
20	2,34	17,32

$t^\circ_{росы} = 12^\circ\text{C}$;
$t^\circ_{воздуха} = 18^\circ\text{C}$;

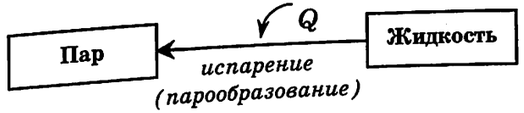
$$\varphi = \frac{1{,}40}{2{,}06} \cdot 100\% \approx 68\%;$$

$$\varphi = \frac{10{,}67}{15{,}39} \cdot 100\% \approx 69\%.$$

$$T = \text{const}; \quad \Delta T = 0; \quad \Delta U = 0.$$

$$V_2 > V_1; \quad \Delta V > 0; \quad A' > 0.$$

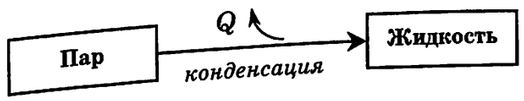
$$Q = \Delta U + A' = A' > 0.$$



$$T = \text{const}; \quad \Delta T = 0; \quad \Delta U = 0.$$

$$V_2 < V_1; \quad \Delta V < 0; \quad A' < 0.$$

$$Q = \Delta U + A' = A' < 0.$$



$Q = +Lm$ — для испарения жидкости,

$Q = -Lm$ — при конденсации пара в жидкость,

L — удельная теплота парообразования при данной температуре.

t° C	L, кДж/кг
0	2500
20	2453
50	2382
100	2256

$$U = \sum_{i=1}^{N} W_{к,i} + \sum_{i=1}^{N} W_{п,i};$$

$$\sum_{i=1}^{N} W_{к,i} > 0; \sum_{i=1}^{N} W_{п,i} < 0.$$

несложной процедурой, а по ней можно прочитать в специальной таблице давление насыщенного пара, то описанный способ успешно применяется для измерения абсолютной влажности воздуха, то есть давления или плотности водяного пара.

Прибор для измерения точки росы показан на рисунке. Продувая при помощи груши воздух через металлическую коробочку с эфиром, мы способствуем быстрому испарению эфира. При этом дно коробочки резко охлаждается.

Воздух с водяными парами, прилегающий ко дну, охлаждается при постоянном давлении, и когда температура эфира достигнет точки росы, на дне коробочки выпадает роса. Ее появление нетрудно заметить по помутнению полированной поверхности. Температура эфира измеряется термометром. Далее пользуются таблицей зависимости давления насыщенного пара от температуры и находят искомое давление водяного пара в атмосфере.

Как уже отмечалось, первый закон термодинамики позволяет предсказать (а опыт подтверждает это предсказание), что процесс конденсации пара при постоянной температуре сопровождается выделением некоторого количества теплоты (см. § 38). Точно также, если процесс испарения жидкости проводить при неизменной температуре, то нужен непрерывный подвод теплоты к ней.

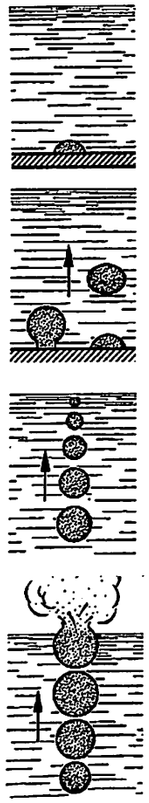
Это количество теплоты компенсирует уменьшение внутренней энергии, которое происходит из-за того, что жидкость покидают наиболее «энергичные» молекулы.

Для испарения 1 кг жидкости при постоянной температуре требуется вполне определенное количество теплоты. Оно называется удельной теплотой испарения или парообразования и является еще одной тепловой характеристикой вещества.

Значение удельной теплоты испарения или парообразования зависит от температуры, при которой происходит данный процесс. Этот факт можно обосновать на основе МКТ следующим образом.

При повышении температуры средняя кинетическая энергия молекул жидкости увеличивается. Потенциальная энергия, зависящая от расстояния между частицами, также увеличивается, оставаясь отрицательной по значению. Поэтому для отрыва молекулы от жидкости при большей температуре нужно меньшее значение энер-

Кипение жидкости

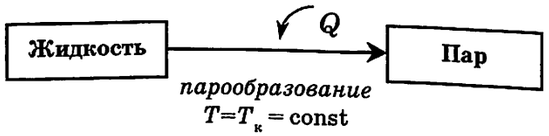


Поверхность пузырька газа в жидкости — свободная поверхность, через которую происходит испарение жидкости внутрь пузырька.

Давление пара в пузырьке растет за счет изменения массы пара до тех пор, пока пар не станет насыщенным. Объем пузырька увеличивается и при некоторой температуре, он начинает всплывать, так как архимедова сила зависит от объема.

Поднимаясь вверх, пузырек оказывается в более холодных слоях жидкости. Давление насыщенного пара уменьшается за счет конденсации. Значит, по пути движения пузырька происходит выделение тепла, которое передается жидкости. Объем пузырька при этом уменьшается, пузырек схлопывается.

Когда жидкость прогреется равномерно и давление насыщенного пара станет равным атмосферному, пузырек выбрасывает пар в атмосферу. Нагревание жидкости прекращается. Она кипит.



Кипение

1. Процесс испарения жидкости, происходящий из всего ее объема, а не только с внешней свободной поверхности жидкости;

2. Происходит, если выполнены два условия:
— температура жидкости при данном внешнем давлении равна температуре кипения;
— происходит постоянный приток тепла;

3. Температура кипения зависит от рода жидкости и внешнего давления;

4. Количество теплоты, необходимое для поддержания кипения можно рассчитать по формуле: $Q = Lm$,
где L — удельная теплота парообразования при температуре кипения, m — масса испаряющейся из всего объема жидкости.

гии. Следовательно, удельная теплота парообразования уменьшается с ростом температуры жидкости.

Наиболее интенсивное испарение жидкости происходит при кипении жидкости. Чтобы подчеркнуть это, вместо термина «испарение» используют даже другой термин — «парообразование».

Кипение жидкости — это следующий в нашем рассмотрении тепловой процесс в жидкости. Протекание этого процесса связано с тремя фактами. Первый: свободная поверхность жидкости может существовать и внутри объема жидкости, если в ней имеются пузырьки газа. Второй факт: эти пузырьки — «закрытые сосуды», то есть в них водяной пар всегда насыщенный. Третий факт: давление насыщенного пара увеличивается с ростом температуры.

Поэтому следует ожидать, что при изменении температуры жидкости, в которой имеются растворенные газы (микроскопические пузырьки газа), будет наблюдаться еще один вид передачи тепла, связанный с испарением жидкости внутрь пузырька в более прогретых слоях жидкости и последующей конденсацией пара в менее нагретых слоях. Таким образом, пузырек «забирает» у жидкости тепло в одном месте и «транспортирует» его в другое. Это приводит к быстрому прогреванию жидкости по всему объему.

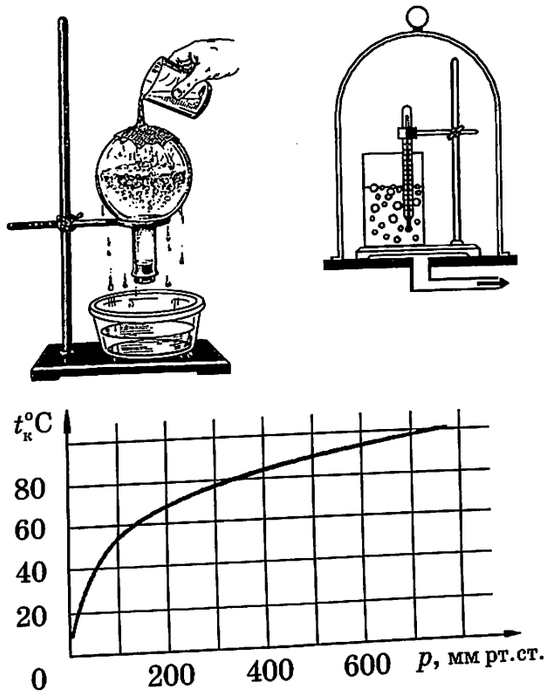
Когда жидкость прогреется, объем пузырька при подъеме вверх не только не уменьшается, а начинает расти, так как в верхних слоях гидростатическое давление меньше, чем в нижних.

Дойдя до свободной поверхности жидкости, пузырек выбрасывает находящийся в нем пар в атмосферу. Жидкость кипит.

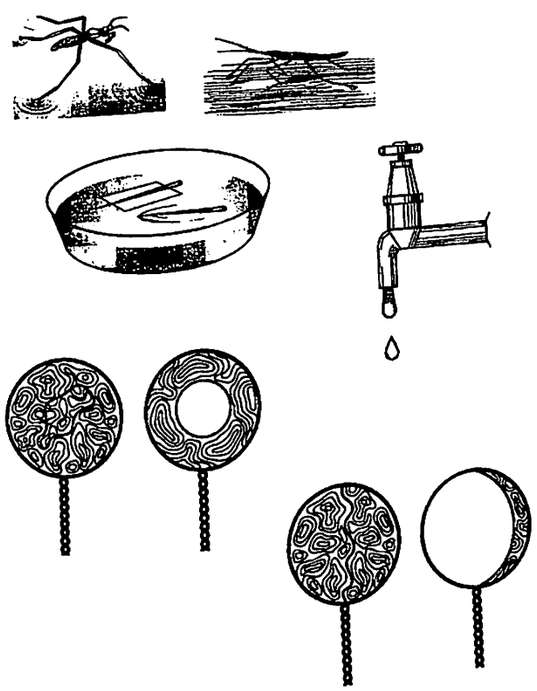
Процесс кипения характеризуется двумя признаками. Во-первых, кипение начинается при температуре, когда давление насыщенного пара равно давлению внутри жидкости (то есть сумме гидростатического и атмосферного давления). Только в этом случае пузырек с паром способен расширяться и выбрасывать пар в атмосферу.

Во-вторых, кипение происходит при постоянной температуре. Это связано с тем, что пузырьки «отнимают» тепло во всем ее объеме за счет испарения жидкости, и «выводят» его в атмосферу. Поэтому процесс кипения нуждается в постоянном притоке теплоты.

Кипение продолжается до тех пор,



Поверхностное натяжение



Молекулы поверхностного слоя находятся в среднем на больших расстояниях друг от друга, чем молекулы внутри жидкости.

пока тепло подводится к жидкости и пока вся жидкость не выкипит.

Рассмотрение механизма кипения позволяет предсказать, что температура кипения зависит от значения внешнего атмосферного давления. Чем выше атмосферное давление, тем большим должно быть давление насыщенного пара, а следовательно, и температура жидкости. Напротив, при уменьшении внешнего давления температура кипения должна уменьшаться.

Эти выводы полностью подтверждаются опытом. Мы приводим в качестве иллюстрации график зависимости температуры кипения воды от внешнего (атмосферного) давления. На рисунках также показаны схемы простых установок, при помощи которых можно убедиться в справедливости теоретических предсказаний.

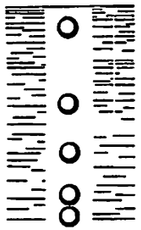
Рассмотрим теперь феномен поверхностного натяжения, который также обусловлен особым состоянием молекул жидкости, которые находятся в ее поверхностном слое.

Мы уже упоминали о том, что в тех случаях, когда масса жидкости очень мала (а тогда мала и сила тяжести, действующая на Земле на каплю), жидкость принимает форму сферы — это и есть «собственная» форма жидкости. Такая форма, с одной стороны отражает характер сил, действующих между молекулами жидкости, и хаотичность в их расположении. С другой стороны, такая форма свидетельствует о том, что при данном объеме жидкость принимает форму, при которой площадь свободной поверхности минимальна. Иначе говоря, такую форму, чтобы число молекул, образующих свободную поверхность, было минимальным.

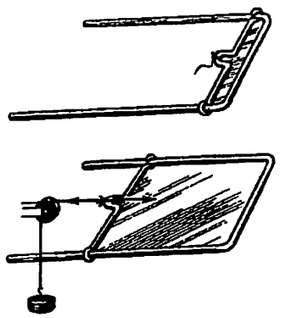
Целый ряд простых опытов позволяет обнаружить это свойство поверхности жидкости: в каждом случае площадь свободной поверхности оказывается наименьшей из возможных при данном объеме жидкости.

Поверхность жидкости — это не геометрическая, сколь угодно тонкая поверхность, а слой очень малой толщины (в несколько диаметров молекул). Чем ближе к наружному слою этой поверхности находится молекула, тем сильнее проявляется асимметрия в расположении ее соседей: у «поверхностных» молекул меньше соседей «сверху».

Это, в свою очередь, означает, что в результате действия молекулярных сил



Молекулы в поверхностном слое расположены в среднем на больших расстояниях друг от друга, чем молекулы внутри жидкости, таким образом, жидкость в поверхностном слое оказывается «растянутой».



Чтобы растянуть мыльную пленку, то есть увеличить площадь ее свободной поверхности, нужно совершить работу. Следовательно, поверхность пленки обладает избыточной «поверхностной» энергией.

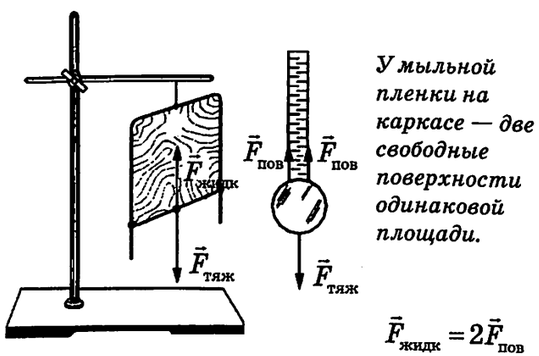
Избыточная потенциальная энергия молекул поверхностного слоя называется поверхностной энергией. Это — вид внутренней энергии, присущий жидкостям.

$$U_{пов} \sim S_{своб};$$

$$U_{пов} = \sigma S_{своб};$$

$$\sigma = \frac{U_{пов}}{S_{своб}}; \quad \sigma \doteq U_{пов} \text{ при } S_{своб} = 1\ м^2;$$

$$[\sigma] = \left[\frac{U_{пов}}{S_{своб}}\right] = \frac{Дж}{м^2} = \frac{Н \cdot м}{м^2} = \frac{Н}{м}.$$



У мыльной пленки на каркасе — две свободные поверхности одинаковой площади.

$$\vec{F}_{жидк} = 2\vec{F}_{пов}$$

Так как подвижная перемычка находится в равновесии, то ее сила тяжести уравновешивается силами поверхностного натяжения.

плотность расположения молекул в поверхностном слое меньше, чем внутри жидкости, на глубине. Таким образом, жидкость в поверхностном слое как бы оказывается растянутой, то есть находится в напряженном состоянии.

Это можно обнаружить, положив на поверхность жидкости иглу, лезвие бритвы, кнопку и т.п. Можно даже заметить, как деформируется, прогибается не разрушаясь, эта поверхностная пленка под действием веса этих тел.

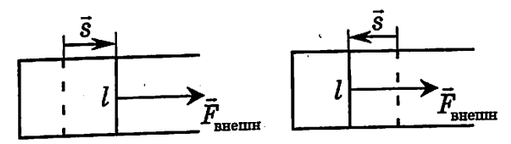
К описанию этого явления можно подойти и с позиций закона сохранения энергии. Чтобы увеличить площадь свободной поверхности жидкости, нужно совершить работу (подуть в трубочку и выдуть мыльный пузырь, потянуть за скобку и растянуть пленку на прямоугольном каркасе и т.п.). На молекулярном уровне — совершить работу по «вытаскиванию» молекул изнутри жидкости на поверхность. Эта работа приводит к увеличению внутренней (поверхностной) энергии жидкости.

Следовательно, молекулы в поверхностном слое обладают избыточной, по сравнению с молекулами внутри жидкости, потенциальной энергией. Эта избыточная потенциальная энергия — один из видов внутренней энергии, присущих жидкостям.

Чем больше площадь свободной поверхности жидкости, тем большую работу совершили внешние по отношению к жидкости силы, приведшие к образованию этой поверхности. Но работа внешних сил равна изменению внутренней (поверхностной) энергии. Следовательно, поверхностная энергия тем больше, чем больше площадь свободной поверхности. Коэффициент пропорциональности получил название коэффициента поверхностного натяжения. Его физический смысл очевиден: коэффициент поверхностного натяжения показывает, чему равна поверхностная энергия 1 м² свободной поверхности данной жидкости.

Проделаем следующий опыт. Возьмем прямоугольный проволочный каркас, одна сторона которого длиной l может без трения скользить в вертикальной плоскости. Если погрузить каркас в мыльный раствор, то получим на нем мыльную пленку.

Площадь этой пленки можно увеличить, если потянуть перекладину вниз. Если освободить перекладину, то она сразу придет в движение: мыльная пленка начнет сокращать свою поверхность, поднимая перекладину. Следовательно, на перекладину со стороны жидкости действует сила, которая и приводит к сокращению поверхности пленки. Эта сила получила название **силы поверхностного натяжения.**



$$A' = F_{внешн} s \cos\alpha, \quad \alpha = \left(\vec{F}_{внешн}\, \vec{s}\right);$$

$\alpha = 0°$; $\cos\alpha = 1$; $\quad \alpha = 180°$; $\cos\alpha = -1$;

$\vec{F}_{внешн} \uparrow\uparrow \vec{s}$; $\quad \vec{F}_{внешн} \downarrow\uparrow \vec{s}$;

$A' = F_{внешн} s$; $\quad A' = -F_{внешн} s$;

Так как перекладина движется равномерно, то:

$$F_{внешн} = 2F_{пов};$$

$A' = 2F_{пов} s$; $\quad A' = -2F_{пов} s$;

По первому закону термодинамики:

$$\Delta U = Q + A';$$

$Q = 0$, так как теплообмен отсутствует;

$$\Delta U = \Delta U_{пов} = U_{пов,2} - U_{пов,1};$$

$$\Delta U_{пов} = A'.$$

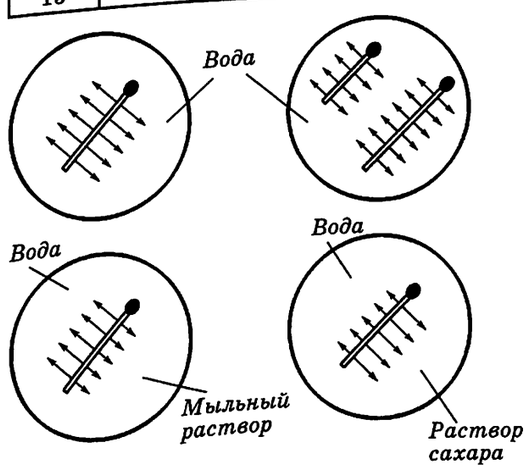
$\Delta U_{пов} = \sigma \Delta S_{пов}$; $\quad \Delta U_{пов} = \sigma \Delta S_{пов}$;

$\Delta U_{пов} = 2\sigma l s$; $\quad \Delta U_{пов} = -2\sigma l s$;

$2\sigma l s = 2F_{пов} s$; $\quad -2\sigma l s = -2F_{пов} s$;

$$F_{пов} = \sigma l.$$

$t°$ C	σ, мН/м	$t°$ C	σ, мН/м
0	75,6	20	72,7
5	74,9	40	69,5
10	74,2	60	66,2
15	73,5	80	62,6



Эта сила приложена к перекладине, а она является той линией, вдоль которой поверхность пленки в данном случае может изменяться. Сила поверхностного натяжения направлена в сторону возможного сокращения пленки перпендикулярно к перекладине и вдоль поверхности жидкости.

Поскольку у мыльной пленки две свободные поверхности, то на перекладину действуют две равные параллельные силы поверхностного натяжения, направленные вверх и уравновешивающие вес груза, подвешенного к перекладине.

Если перемещение перекладины составит $\vec{s}$,то сила поверхностного натяжения совершит работу, которая может быть подсчитана по известной формуле.

По закону сохранения энергии эта работа равна изменению поверхностной энергии. Это изменение энергии также можно подсчитать, так как известно изменение площади поверхности пленки.

Приравнивая работу силы соответствующему изменению энергии, получим: сила поверхностного натяжения равна произведению коэффициента поверхностного натяжения на длину границы поверхностного слоя.

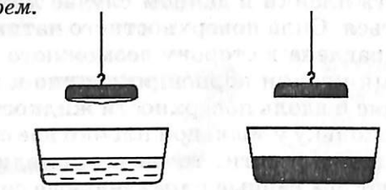
Подчеркнем еще раз, что сила поверхностного натяжения приложена не к жидкости (не к самой себе!), а к другому телу. В нашем случае к проволочному каркасу и перекладине. Подвижная перекладина потребовалась для того, чтобы обнаружить эту силу и найти ее значение.

Коэффициент поверхностного натяжения можно измерить разными способами. В таблице приведены значения коэффициента поверхностного натяжения для ряда жидкостей.

Так как силы поверхностного натяжения по своей природе являются силами молекулярного взаимодействия, то коэффициент поверхностного натяжения зависит не только от рода жидкости, но и от температуры. При повышении температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается. На коэффициент поверхностного натяжения значительное влияние оказывают также примеси.

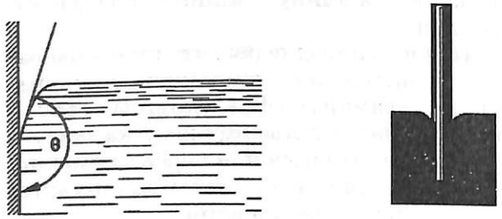
Смачивание и капиллярность

Несмачивающая жидкость образует на данной поверхности капли–шарики, а смачивающая растекается по той же поверхности тонким слоем.

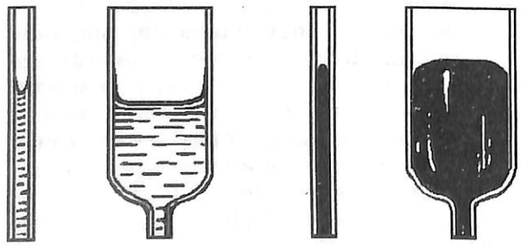


Вода смачивает чистое стекло и «прилипает» к стеклянной пластинке. Ртуть стекло не смачивает.

Краевой угол — острый, если жидкость смачивает данную твердую поверхность. В этом случае жидкость слегка приподнимается по стенке сосуда.



Краевой угол — тупой, если жидкость не смачивает данную поверхность. В этом случае жидкость слегка опускается вблизи поверхности твердого тела.



Форма мениска зависит от рода жидкости и радиуса трубки.

Обычно жидкости находятся в сосудах, или естественных хранилищах (океан, море, озеро). Поэтому молекулы жидкости при движении оказывают давление на стенки сосуда, а вблизи свободной границы жидкости между жидкостью и твердым телом можно наблюдать краевые эффекты. Они обусловлены взаимодействием молекул жидкости с молекулами твердого тела.

Конечно, сразу можно допустить два возможные варианта соотношения силы взаимодействия молекул. Первый вариант: силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем силы взаимодействия молекул жидкости и твердого тела. Второй вариант: силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше, чем силы взаимодействия молекул жидкости и твердого тела.

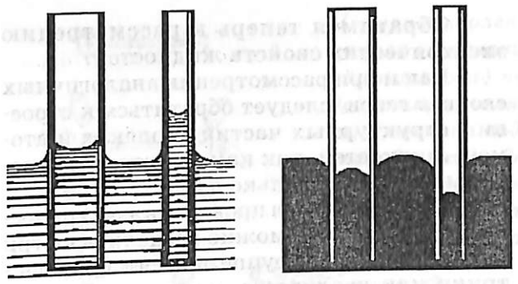
В первом случае говорят, что жидкость не смачивает тело, а во втором — смачивает. Название явления происходит от характера искривления свободной поверхности жидкости вблизи данного твердого тела. Рассмотрев рисунки, вы сразу определите, что вода смачивает стекло, стремясь растечься по его поверхности, а ртуть не смачивает стекло, образуя капли, имеющие малую площадь соприкосновения с опорой.

Характеризовать явление смачивания можно при помощи **краевого угла.** Обратите внимание: форма поверхности жидкости в том месте, где она соприкасается с твердой стенкой и газом искривляется. Если провести касательную к поверхности жидкости, то она образует с твердой стенкой острый краевой угол, если жидкость смачивает твердое тело, и тупой краевой угол, если — не смачивает. (Угол отсчитывается от касательной к стенке внутри жидкости.)

Если воспользоваться моделями абсолютно смачивающей и абсолютно несмачивающей жидкости, то краевые углы в этих случаях будут равны соответственно 0° и 180°. Таким образом, свободная поверхность жидкости в сосуде горизонтальна только вдали от его стенок.

Если же сосуд очень узкий (трубка с малым внутренним диаметром) , то вся поверхность жидкости оказывается искривленной, образуя **мениск.** В случае несмачивающей жидкости мениск выпуклый, а в случае смачивающей — вогнутый.

При полном смачивании или несмачивании мениск имеет форму полусферы, радиус которой равен радиусу канала трубки.



1. По третьему закону Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{пов. нат.}} = -\vec{F}_{\text{тв. т.}};$$

$$F_{\text{пов. нат.}} = \sigma l = \sigma \cdot 2\pi r;$$

$$F_{\text{тв. т.}} = 2\pi\sigma r.$$

2. Сила тяжести столбика жидкости в трубке:

$$F_{\text{тяж}} = mg;$$

$$m = \rho V = \rho h S = \rho h \cdot \pi r^2.$$

3. Так как столбик жидкости находится в равновесии:

$$\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{тв. т.}} = 0;$$

$$-\rho g h \cdot \pi r^2 + 2\pi\sigma r = 0;$$

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

Капиллярные явления:

1. Движение и сохранение воды в почве обусловлено наличием или отсутствием капилляров в ней;

2. Разрушение горных пород связано с проникновением воды по узким трещинам и последующим ее замерзанием в них;

3. Использование пористых материалов (промокательной бумаги, салфеток, полотенец) позволяет удалять излишек чернил, воды и других жидкостей с разных поверхностей;

4. Поднятие керосина, стеарина и смазочных масел по капиллярам используется в устройстве ламп, свечей и для смазки деталей машин;

5. В строительном деле из-за капиллярных явлений отсыревают стены зданий. Следовательно, необходимо предотвращать капиллярность материалов фундаментов путем применения битума и специальных материалов.

Наиболее отчетливо явления смачивания и несмачивания проявляются в очень тонких трубках — **капиллярах.** Если такие трубки (например, стеклянные) частично погрузить в воду и ртуть, то вода начнет подниматься по трубке вверх, а ртуть — опускаться вниз.

Капиллярными явлениями называют подъем или опускание жидкости в узких трубках по сравнению с уровнем жидкости в широких сосудах.

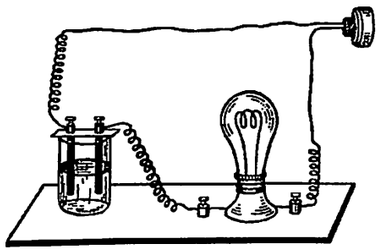
Опыт показывает, что высота подъема данной жидкости (воды) в трубке, изготовленной из некоторого вещества (стекла), зависит от радиуса трубки: чем меньше радиус трубки, тем на большую высоту поднимается смачивающая и опускается несмачивающая жидкость.

Высоту подъема жидкости в капиллярной трубке можно подсчитать. Будем считать жидкость идеально смачивающей, а трубку такой узкой, что форма мениска — полусфера. Тогда вдоль границы свободной поверхности жидкости, представляющей собой окружность радиуса r (внутренний радиус трубки) на твердое тело со стороны жидкости действуют силы поверхностного натяжения. Они направлены вниз, стремясь уменьшить площадь свободной поверхности жидкости. Тогда на жидкость со стороны твердого тела, по третьему закону Ньютона, действует равная и противоположно направленная сила.

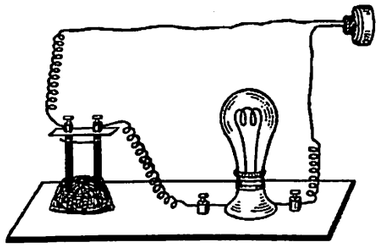
Следовательно,на жидкость, находящуюся в трубке, действуют две силы: ее сила тяжести и сила, равная силе поверхностного натяжения, со стороны стенок трубки, направленная вертикально вверх. Эти силы компенсируют друг друга, так как столбик жидкости находится в равновесии.

Записывая выражения для силы тяжести и силы поверхностного натяжения и приравнивая их, получим формулу для расчета высоты подъема жидкости в капилляре.

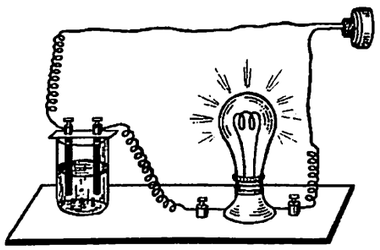
Капиллярные явления чрезвычайно широко распространены в природе. Например, движение воды в почве обусловлено капиллярными явлениями. По капиллярам в растительных и живых организмах к отдельным клеткам подаются питательные вещества, вода и кислород крови. В быту и технике часто приходится учитывать возможность появления этих явлений с тем, чтобы предотвратить их или ослабить, или, напротив, создать условия, при которых эти явления будут ярко выраженными.



Дистиллированная вода не проводит ток.



Сухая соль не проводит ток.



Через раствор соли в воде ток течет и лампа горит.

Электролитическая диссоциация — процесс распада нейтральной молекулы на ионы под действием молекул воды.

Обратимся теперь к рассмотрению **электрических свойств** жидкостей.

Как и при рассмотрении аналогичных свойств газов, следует обратиться к строению структурных частиц (молекул и атомов) жидкостей, так как заряженные частицы находятся только в них.

По способности проводить электрический ток жидкости можно разделить на три группы. К первой группе относятся диэлектрики или изоляторы, в которых свободных заряженный частиц чрезвычайно мало. Поэтому сила тока в них даже при больших напряжениях практически равна нулю.

Ко второй группе относятся полупроводники, в которых концентрация заряженных частиц зависит от температуры и освещенности. Наконец, к третьей группе относятся проводники, то есть жидкости у которых имеются свободные заряженные частицы.

Наибольший интерес для нас будет представлять вопрос об электрическом токе в электролитах — расплавах и водных растворах солей, щелочей и кислот, поэтому рассмотрим его более подробно.

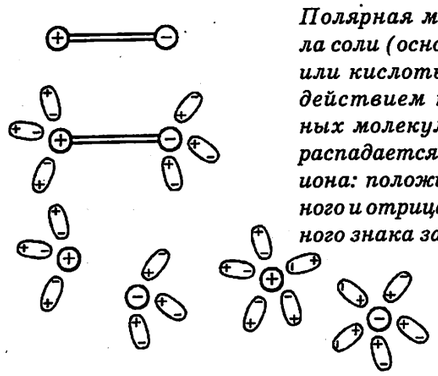
Простой опыт позволяет убедиться в том, что дистиллированная вода не проводит электрический ток, то есть является диэлектриком. Сухая поваренная соль также не проводит ток: лампочка не горит, когда электроды погружены в нее.

Однако, погрузив в дистиллированную воду электроды с прилипшей к ним солью, сразу обнаружим отклонение стрелки амперметра — в цепи течет электрический ток.

Этот опыт свидетельствует о том, что хотя в каждом ингредиенте свободных заряженных частиц нет, при растворении соли в воде, они появляются. Каков же механизм образования свободных зарядов в электролитах и какова их природа?

Из-за взаимодействия с полярными молекулами воды молекулы растворяемого вещества распадаются на разноименные ионы или **диссоциируют**. Степень диссоциации, то есть доля молекул растворенного вещества, которые распадаются на ионы, зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости растворителя (в данном случае воды).

При повышении температуры (при прочих равных условиях) число распавшихся на ионы молекул увеличивается,

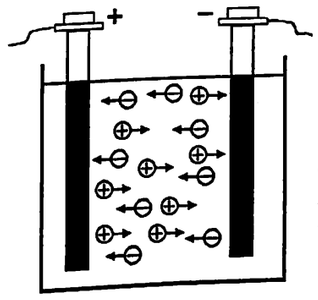


Полярная молекула соли (основания или кислоты) под действием полярных молекул воды распадается на два иона: положительного и отрицательного знака заряда

n_+ – *концентрация положительных ионов;*

n_- – *концентрация отрицательных ионов;*

$n_+ = n_-$



Электрическая цепь, содержащая электролитическую ванну, не является однородной цепью. Поэтому силы тока в ванне и подводящих проводах различны. Амперметр, включенный последовательно электролитической ванне, показывает вдвое меньшую, чем в ванне, силу тока.

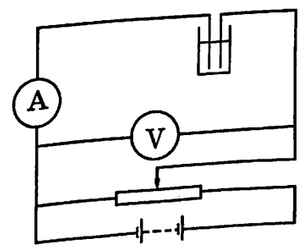
$$I = \frac{q}{t};$$

$$I_{\text{электролит}} = \frac{q_+ + |q_-|}{t};$$

$$I_{\text{провод}} = \frac{q_e}{t};$$

$$I_{\text{электролит}} > I_{\text{провод}}.$$

Электролиз — процесс выделения химически чистых веществ на электродах при протекании электрического тока через электролит.



следовательно, растет концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.

Ионы совершают тепловое движение вместе с молекулами воды и могут **рекомбинировать**, то есть объединяться в нейтральную молекулу. Вероятность такого процесса возрастает, когда концентрация ионов в растворе достаточно велика.

Поэтому при неизменных условиях в растворе электролитов со временем устанавливается динамическое равновесие: число молекул, диссоциированных на ионы за 1 с, равно числу молекул, образованных за 1 с в результате рекомбинации. В этом случае концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов одинаковы и остаются постоянными до тех пор, пока не изменятся внешние условия.

Если в сосуд с электролитом поместить электроды и замкнуть электрическую цепь, то в ней потечет электрический ток.

Данная цепь является неоднородной: внутри электролита электрический ток создается встречными потоками положительных и отрицательных ионов, а вне электролита электрический ток в металлических проводах создается электронами.

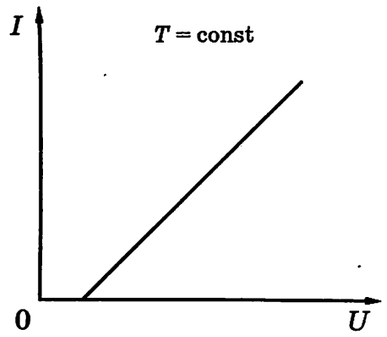
Ионы движутся только внутри электролита. Положительно заряженные ионы (чаще всего это ионы металлов и водорода) — катионы, подходя к катоду, то есть отрицательно заряженному электроду, получают недостающий им электрон и «восстанавливаются», становятся нейтральным атомом. Отрицательно заряженный ион — анион, подходит к аноду, положительному электроду, и отдают ему избыток электронов, то есть окисляются.

Таким образом, протекание тока через электролит с физической точки зрения — это движение ионов в электрическом поле, созданном электродами, погруженными в электролит, а с точки зрения химии — окислительно-восстановительный процесс.

При протекании тока через электролит на электродах происходит выделение химически чистых веществ — **электролиз**.

С помощью электрической цепи, схема которой представлена на рисунке, можно получить вольтамперную характеристику электролита.

Опыт показывает, что при постоянной температуре в электролитах выполняется закон Ома для участка цепи. Это можно объяснить следующим образом.



Прямая не проходит через ноль, а сдвинута вправо, так как при погружении электродов в электролит происходит поляризация электродов.

1. Масса вещества, выделившегося на одном электроде:

$$m = m_i \cdot N;$$

$$m_i = \frac{M}{N_A};$$

где M — молярная масса атома (иона).

2. Число ионов, подошедших к одному электроду:

$$N = \frac{q}{q_i} = \frac{I\Delta t}{q_i};$$

где q — заряд перенесенный ионами одного знака.

3. Заряд иона кратен заряду электрона:

$$q_i = ne,$$

где n — валентность данного атома в соединении.

4. Тогда для массы вещества, выделившегося на одном электроде, получим:

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot \frac{I\Delta t}{ne} = \frac{M}{N_A ne} \cdot I\Delta t = kI\Delta t.$$

Электрохимический эквивалент

1. Обозначение: k;

2. Характеризует вещество;

3. Физический смысл: электрохимический эквивалент показывает, какая масса вещества выделяется на данном электроде за 1 с при силе тока в цепи 1 А;

4.

$$[k] = \left[\frac{m}{I\Delta t}\right] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}.$$

В отсутствие электрического поля ионы совершают тепловое движение. Когда в электролите создается электрическое поле, на все ионы (а они имеют одинаковые по значению заряды) начинают действовать электрические силы, которые сообщают ионам ускорение. В результате частицы одного знака как бы «сносятся» полем в одном направлении.

Чем больше напряжение между электродами, тем больше напряженность электрического поля и тем больше ускорение «упорядоченного» движения ионов. В этом случае на протяжении свободного пробега ионов средняя скорость упорядоченного движения возрастает. Но это означает, что через любое поперечное сечение электролита за 1 с будет переноситься большее число ионов, то есть пройдет больший заряд. Следовательно, сила тока через электролит увеличится пропорционально напряжению.

Поскольку теперь механизм протекания тока через электролит описан, мы можем установить, чему равна масса вещества, выделившегося на электроде.

Понятно, что масса выделившегося вещества зависит от времени протекания тока. Поэтому выберем промежуток времени Δt и подсчитаем число ионов N, которые за это время подойдут к электроду. Так как заряд одного иона нам известен (он зависит от химического состава соли, кислоты или основания), то можно подсчитать общий заряд всех ионов, зная силу тока в цепи и этот промежуток времени.

Но все ионы одного знака имеют вполне определенную массу. Следовательно, масса выделившегося на электроде вещества в N раз больше массы одного иона.

Так как ион превращается в нейтральный атом (или молекулу) на электроде, то массу его можно найти по молярной массе и числу Авогадро. А заряд иона равен произведению заряда электрона на валентность атома (или группы атомов) в молекуле, которая диссоциировала.

Таким образом, масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна силе тока и времени, в течение которого происходит выделение вещества на электроде. Коэффициент пропорциональности называется **электрохимическим эквивалентом** данного вещества.

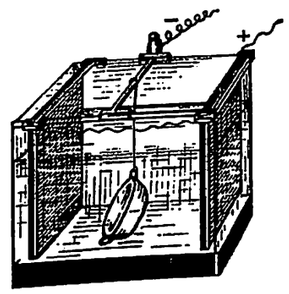
Этот закон был получен экспериментально М. Фарадеем в 1836 году и носит название закона электролиза Фарадея, а мы получили его теоретическим путем, пользуясь механизмом тока в электролите.

$$k = \frac{M}{N_A ne} = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n} = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n};$$

F — число (постоянная) Фарадея;

$$[F] = [eN_A] = \frac{\text{Кл}}{\text{моль}};$$

$$F = 9{,}65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}.$$



Для равномерного покрытия изделия слоем металла применяют два анода, между которыми располагают само изделие, являющееся катодом.

Заметим, что полученный закон позволил Фарадею установить очень интересный факт. Для того, чтобы выделить на электроде один моль любого одновалентного вещества, требуется пропустить через электролит один и тот же электрический заряд. Эта постоянная величина была экспериментально определена Фарадеем и носит его имя.

Для нас этот факт очевиден: ведь один моль любого вещества содержит число Авогадро атомов, а заряд любого одновалентного иона равен заряду электрона. Но Фарадей-то не знал о существовании электрона!

Измерив постоянную Фарадея и зная число Авогадро, можно было рассчитать заряд однозарядного иона (точнее, электрона). Тогда заряд двухвалентного иона в два раза больше, трехвалентного — в три раза больше этого заряда. Вот тогда-то впервые и зародилось представление о том, что в природе существует не уменьшаемый (элементарный) электрический заряд.

Значение элементарного заряда, вычисленного на основании опытов по электролизу, совпадает со значением заряда электрона, полученным другими способами. Это еще раз подтверждает единство физического мира и адекватность его описания различными физическими теориями.

Электролиз получил широкое применение в технике.

Прежде других применений назовем получение химически чистых веществ, в частности, металлов. Лучшим проводником из металлов является чистая, лишенная примесей, медь. Очищение меди от примесей путем электролиза называется рафинированием.

При помощи электролиза получают алюминий из расплава его оксидов. Так же получают натрий, калий, магний, кальций и другие металлы.

Электролиз используют для покрытия металлических изделий тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, серебрение, золочение и т.п.). Эта процедура называется **гальваностегией**, она не только придает изделиям привлекательный вид, но и защищает его от коррозии.

Наконец, **гальванопластика** позволяет получать электролитические копии рельефных предметов (медалей, гравюр, барельефов и т. п.)

Технические применения электролиза:

1. Получение химически чистых веществ из растворов электролитов;

2. Рафинирование меди (получение электролитической, особо чистой меди);

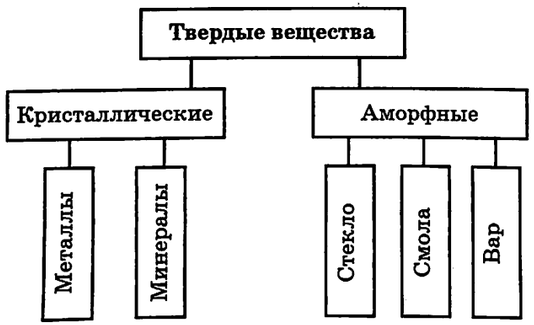
3. Электрометаллургия алюминия;

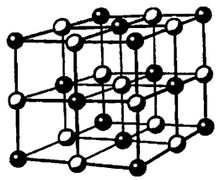
4. Гальваностегия (покрытие изделий тонким слоем металлов);

5. Гальванопластика — изготовление точных копий с рельефных изделий (скульптура, полиграфия, получение бесшовных труб и т.п.).

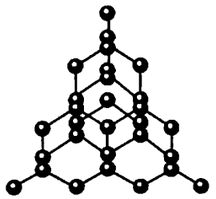
Б. С. Якоби (1801 — 1874)

§ 40. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА И ИХ СВОЙСТВА

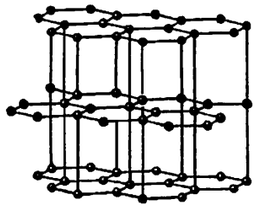




Кристаллическая решетка поваренной соли



Кристаллическая решетка алмаза



Кристаллическая решетка графита

Твердые тела играют важную роль в жизни человека в первую очередь потому, что являются основными материалами, из которых изготавливают все сооружения, машины и автоматы, предметы быта и т.п.

Рассмотрим теперь основные свойства твердых тел, обусловившие такие обширные их применения.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории твердые тела состоят из частиц, которые расположены на малых расстояниях друг от друга и взаимодействуют между собой молекулярными силами. Молекулярное взаимодействие удерживает частицы вблизи некоторого положения равновесия, так что отличительным свойством твердых тел, как и жидкостей, является наличие у них собственного объема.

Однако, в отличие от жидкостей, твердые тела сохраняют и свою форму. Это означает, что «время оседлой жизни» у частиц твердого тела очень велико, перескоки в новые положения равновесия практически не происходят. Следовательно, частицы твердого тела, совершая тепловое движение, колеблются вблизи некоторых положений равновесия.

Современные методы физики, такие как рентгеноструктурный анализ, позволяют выяснить характер расположения частиц в твердых телах. Выяснилось, что существует два вида твердых тел.

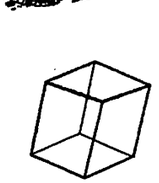
У первых — частицы вещества расположены практически вплотную друг к другу и, в среднем, хаотично. Такие тела называются **аморфными** (битум, различные смолы, парафин, стекло и т.п.).

У тел второй группы частицы расположены в строгом порядке. Если у этих тел соединить между собой центры положений равновесия, то получится правильная пространственная решетка, называемая кристаллической решеткой. Отсюда и название этой группы твердых тел: **кристаллические вещества**.

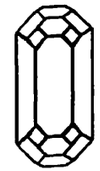
Разный характер расположения частиц в этих телах обусловливает различие в свойствах этих тел. Установим их, но сначала обсудим вопрос о соотношении между средними значениями потенциальной и кинетической энергии частиц твердого тела.

В отличие от газов, у которых потенциальная энергия взаимодействия частиц значительно меньше кинетической энергии

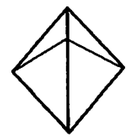
***Кристалл** — тело определенной геометрической формы, ограниченное естественными плоскими гранями.*



Каменная соль

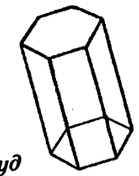


Берилл

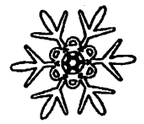


Алмаз

Турмалин



Изумруд



их движения, и от жидкостей, у которых средние значения потенциальной энергии и кинетической энергии примерно одинаковы, у твердых тел средняя потенциальная энергия частиц значительно превосходит среднюю кинетическую энергию их движения.

Действительно, хотя и молекулы твердого тела при данной температуре имеют разные кинетические энергии, в том числе и значительно большие среднего значения энергии, тем не менее и этой энергии «не хватает», чтобы «разорвать» связи, удерживающие молекулу вблизи ее положения равновесия. Именно поэтому твердые кристаллические тела сохраняют неизменной свою форму в довольно широких интервалах температур и геологических времен.

Отличие аморфных тел от кристаллических обнаруживаются уже при первом, визуальном рассмотрении. Кристаллические тела (крупинки сахара, соли, медного купороса,слюды, кварца и т.п.) обязательно имеют естественные (то есть не созданные человеком) плоские, словно отшлифованные грани.

Аморфные тела таких естественных граней не имеют.

Если кристаллическое тело представляет собой один кристалл, то оно называется **монокристаллом**. В виде монокристаллов в природе встречаются кристаллы каменной соли, кварца, алмаза, турмалина, граната, кальцита, изумруда и некоторые другие. В большинстве случаев мы имеем дело с **поликристаллами**, то есть телами, состоящими из отдельных, беспорядочно расположенных, сросшихся между собой мелких кристалликов. Поликристаллами являются все металлы и минералы.

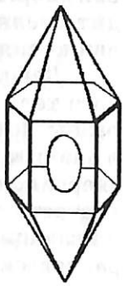
Самым главным признаком кристалла является его **анизотропия**, то есть различие свойств кристалла по разным направлениям.

При этом анизотропия обнаруживается во всех свойствах кристаллов от механических до оптических.

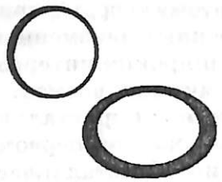
Прежде всего кристаллы обладают анизотропией роста. При образовании кристалла частицы соединяются в определенном порядке, выстраивая грани, характерные для данного вида кристалла.

Анизотропию механических свойств можно обнаружить, если раскалывать, например, кристалл поваренной соли (он имеет кубическую форму). Он будет дробиться

Слюда легко расслаивается на тонкие пластинки только в одном направлении.

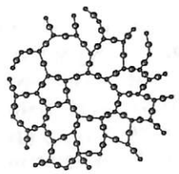


Парафин, покрывающий грань кварца, оплавляется в виде овала, а не круга, когда к нему прикасаются раскаленной иглой. Это свидетельствует об анизотропии теплопроводности.

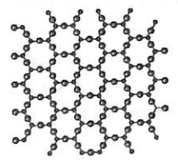


Вырезанный из кварца шарик при нагревании приобретает форму эллипсоида, что свидетельствует об анизотропии теплового расширения.

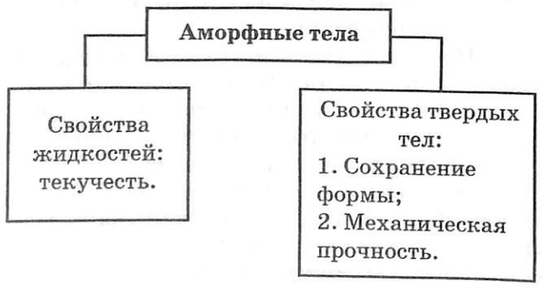
Анизотропия оптических свойств проявляется в двойном лучепреломлении.



У аморфных тел в расположении структурных частиц наблюдается ближний порядок.



У идеальных кристаллов порядок распространяется на все структурные частицы — дальний порядок.



на мелкие осколки, имеющие преимущественно форму прямоугольных параллелепипедов.

Значит, в направлениях, параллельных граням кристалла, прочность кристалла поваренной соли меньше, чем в диагональном и других направлениях.

Кусок слюды легко расслаивается в одном направлении на тонкие пластинки, а в перпендикулярном направлении разделить его очень трудно. Также и кристалл графита: его легко отслаивать только в одном направлении, это делает его пригодным для изготовления карандашей.

Такие же эффекты можно наблюдать и в отношении тепловых, электрических и оптических свойств кристаллов.

Поликристаллы обладают изотропией свойств. Это связано с особенностями строения поликристаллов, о котором говорилось выше.

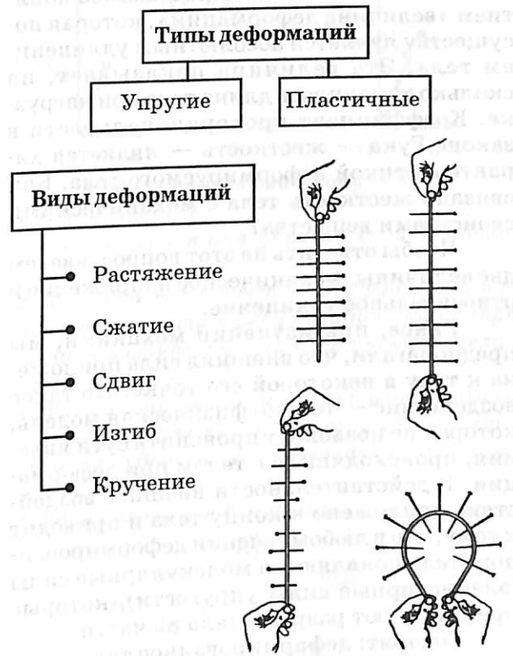
Аморфные тела имеют одинаковые свойства по всем направлениям: они изотропны. Признаком аморфного тела является произвольность формы поверхности при разломе. Но главное отличие аморфных тел от кристаллических проявляется при переходе их в жидкое состояние. В отличии от кристаллических тел этот переход происходит постепенно, аморфные тела не имеют определенной температуры плавления (об этом речь пойдет далее).

На рисунке для сравнения показано расположение частиц в кристаллическом и аморфном телах. Сразу обращает на себя внимание, что строгий порядок в расположении частиц у аморфных тел распространяется на небольшие группы частиц — ближний порядок, в то время как в кристалле порядок расположения — дальний, то есть распространяется (в идеальном кристалле) на все частицы кристалла.

Это делает аморфные тела как бы переходной формой от кристаллов к жидкостям: они обнаруживают как свойства твердых тел, так и свойства жидкостей, только очень вязких. Например, если положить леденцы или вар в воронку, то со временем они растекутся и заполнят отверстие воронки, выходя из него в виде стержня.

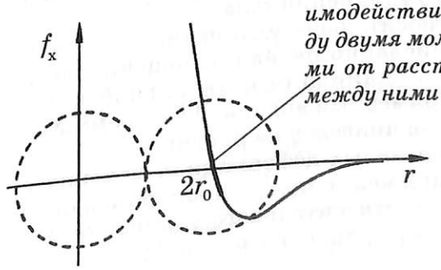
Интересно провести и такой опыт. Если положить в сосуд на дно кусок пробки и засыпать ее кусочками вара, а сверху придавить пластинкой из свинца, то через некоторое время вар образует сплошное тело с горизонтальной поверхностью, свинец погрузится на дно, а пробка окажется на поверхности вара. Этот опыт происходит довольно быстро в помещениях с высокой температурой. В нем аморфное тело обнаруживает свойства жидкости.

Деформация — изменение формы или размеров тела в результате внешнего воздействия.



Деформация тела всегда возниает в результате действия на него другого тела — нагрузки.

Сила упругости, возникающая в деформированном теле всегда приложена к внешнему телу (нагрузке) и направлена в сторону, противоположную смещению частиц тела при деформации.



Участок линейной зависимости силы молекулярного взаимодействия между двумя молекулами от расстояния между ними

При более низких температурах со временем аморфные тела кристаллизуются, то есть самопроизвольно переходят в состояние с минимумом потенциальной энергии.

В дальнейшем, мы будем рассматривать поликристаллические твердые тела и начнем их изучение с изучения **механических свойств.**

Механические свойства твердых тел связаны с их способностью сохранять свою форму. Большинство из них практически не меняют ее, если только внешние воздействия не оказываются слишком большими.

Это происходит потому, что при любой попытке изменить форму или размеры тела, то есть его деформировать, возникают силы упругости, препятствующие дальнейшей деформации тела.

Различают упругие и пластические деформации твердых тел. Критерием, который позволяет определить вид дефомации в данном случае, выступает поведение тела после снятия нагрузки. Если тело восстанавливает свою форму и размеры, то деформация считается упругой, а если не восстанавливает — пластичной.

Все виды деформаций (растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг и кручение) можно свести к двум видам: растяжению и сдвигу.

Рассмотрим деформацию растяжения. Ее испытывают тросы, канаты, цепи в подъемных устройствах, стяжки между вагонами и т.п. Деформация всегда появляется в результате действия на тело внешней силы. В данном случае внешняя сила приводит к увеличению длины тела, а, следовательно, к увеличению расстояния между частицами вещества. Поскольку до действия внешней силы эти частицы находились вблизи положения равновесия, то увеличение расстояния между частицами приводит к появлению сил притяжения между частицами, стремящимися вернуть их к положению равновесия.

Участок графика зависимости силы молекулярного взаимодействия от расстояния между частицами, лежащий вблизи равновестного состояния молекулы, представляет собой отрезок прямой. Следовательно, при малых значениях деформации, сила упругости возникающая в теле оказы-

Закон Гука

1. Устанавливает зависимость силы упругости, возникающей в деформированном теле, от величины деформации;

2. $F_{\text{упр, x}} = -k\Delta l$;

3. k *— жесткость тела, характеризует его упругие свойства;*

4. Выполняется только при малых деформациях.

Механическое напряжение

1. Обозначение: σ;

2. Скалярная физическая величина, характеризующая состояние тела, находящегося под воздействием нагрузки;

3. Формула-определение:

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S};$$

где $F_{\text{упр}}$ *— модуль силы упругости,*
S *— площадь поперечного сечения тела, перпендикулярного направлению силы упругости;*

4. Физический смысл: численно равно значению силы упругости, приходящейся на единицу площади поперечного сечения тела;

5. Единица напряжения: Па

$$[\sigma] = \left[\frac{F_{\text{упр}}}{S}\right] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

Относительное удлинение

1. Обозначение: ε ;

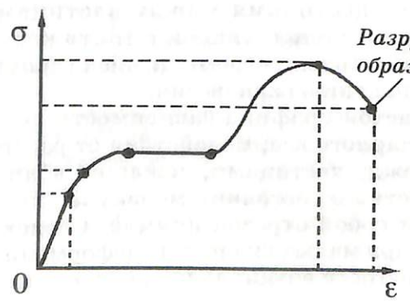
2. Формула-определение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где Δl *— абсолютное удлинение тела,*
l_0 *— начальная длина тела;*

3. Физический смысл: показывает, какую долю первоначальной длины тела составляет абсолютное удлинение;

4. Безразмерная величина.



вается прямо пропорциональной величине деформации. Это положение ранее было установлено нами опытным путем и представляет собой закон Гука.

В этом законе мы пользовались понятием «величина деформации», которая по существу является абсолютным удлинением тела. Эта величина показывает, на сколько изменилась длина тела при нагрузке. Коэффициент пропорциональности в законе Гука — жесткость — является характеристикой деформируемого тела. Как связана жесткость тела с механическими свойствами вещества?

Чтобы ответить на этот вопрос, введем две величины: механическое напряжение и относительное удлинение.

Ранее, при изучении механики, мы предполагали, что внешняя сила приложена к телу в некоторой его точке. Но такое воздействие — только физическая модель, которая не позволяет прояснить сути явления, происходящего с телом при деформации. В действительности внешнее воздействие приложено к концу тела и приводит к тому, что в любом сечении деформированного тела появляются молекулярные силы (элементарные силы упругости), которые препятствуют разрыву тела на части.

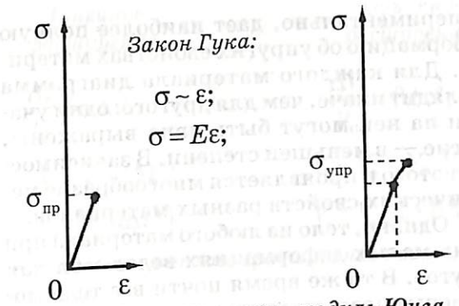
Говорят: деформированное тело находится в напряженном состоянии, которое и характеризуется механическим напряжением.

Скалярная величина, численно равная отношению модуля силы упругости к площади поперечного сечения тела, перпендикулярного направлению силы упругости, называется механическим напряжением.

Для выявления механического свойства вещества, отвечающего за способность его к деформации растяжения, проводят опыт по растяжению стержня из исследуемого материала (например, при помощи гидравлического пресса) и строят **диаграмму растяжения**, то есть график зависимости механического напряжения от относительного удлинения тела.

Относительное удлинение — это величина, численно равная отношению абсолютного удлинения к начальной длине тела. Примерный вид такой диаграммы растяжения приведен на рисунке.

При малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально значению относительного удлинения. Это другая формулировка закона Гука.



Модуль упругости , модуль Юнга

1. Обозначение: E;

2. Характеристика упругих свойств вещества;

3. Выступает в качестве коэффициента пропорциональности между механическим напряжением и относительным удлинением тела в законе Гука;

4. Физический смысл: численно равен механическому напряжению, которое возникает в теле при удвоении его первоначальной длины (или при $\varepsilon = 1$ *);*

5. Единица модуля Юнга: Па.

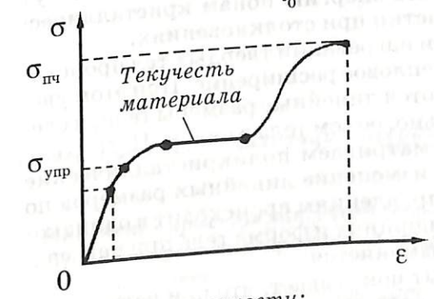
$$\sigma = E|\varepsilon|;$$

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}; \qquad |\varepsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0};$$

$$\frac{F_{\text{упр}}}{S} = E\frac{|\Delta l|}{l_0};$$

$$F_{\text{упр}} = \frac{ES}{l_0}|\Delta l|; \qquad F_{\text{упр}} = k|\Delta l|;$$

$$k = \frac{ES}{l_0}.$$



$\sigma_{\text{пч}}$ *— предел прочности;*

$\sigma_{\text{доп}}$ *— допустимое напряжение конструкции;*

$$n = \frac{\sigma_{\text{пч}}}{\sigma_{\text{доп}}},$$

n *— запас прочности;*

$$1{,}7 \le n \le 10.$$

В этой формулировке коэффициентом пропорциональности выступает коэффициент, который не зависит от формы и размеров тела, а целиком определяется свойствами вещества.

Он называется **модулем упругости** или **модулем Юнга**. Физический смысл модуля Юнга очевиден: он показывает, какое механическое напряжение возникает в стержне из данного вещества при относительном удлинении равном единице.

Фактически ни одно вещество, кроме резины, не может «удвоить свои размеры», оно разрушается при значительно меньших значениях относительного удлинения. Поэтому модуль Юнга определяют опытным путем по диаграмме растяжения.

Простые преобразования позволяют получить связь жесткости тела с его размерами и модулем упругости вещества, из которого оно изготовлено.

Опыты показывают, что закон Гука выполняется в ограниченных пределах. Максимальное напряжение, при котором еще выполняется закон Гука, называется **пределом пропорциональности**.

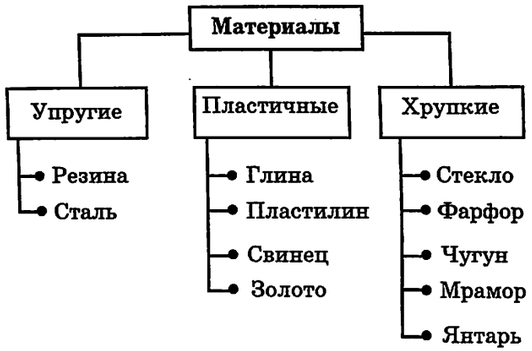
Если продолжать увеличивать нагрузку на тело, то механическое напряжение продолжает увеличиваться нелинейно. В некоторых пределах нелинейной зависимости деформации остаются упругими. Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации, называются **пределом упругости**. Предел упругости превышает предел пропорциональности не более, чем на 0,03%. Поэтому для большинства веществ их можно считать равными.

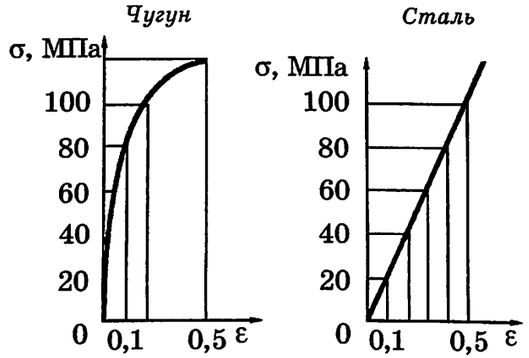
При дальнейшем увеличении относительного удлинения остаточные деформации становятся значительными, то есть при снятии нагрузки тело остается деформированным и, наконец, наступает момент, когда исследуемый образец начинает удлиняться без увеличения нагрузки.

Это явление называется **текучестью материала**, ему соответствует горизонтальный участок на диаграмме растяжения.

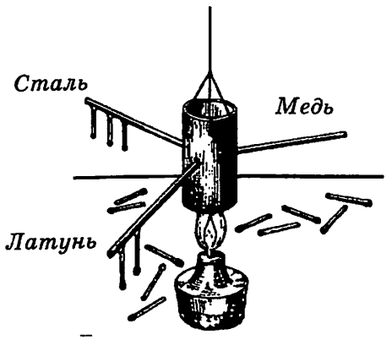
При дальнейшем увеличении нагрузки напряжение снова возрастает и в наименее прочной части образца появляется сужение, которое быстро утоньшается, и образец разрывается. Наибольшее напряжение, которое выдерживает материал без разрушения, называется **пределом прочности**.

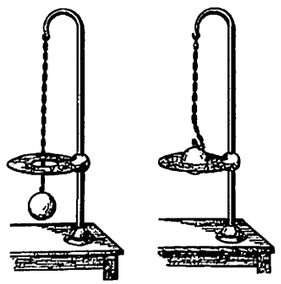
Диаграмма растяжения, полученная





Тепловые свойства твердых тел





Металлический шарик после нагревания не проходит в отверстие, диаметр которого при комнатной температуре больше диаметра шарика.

эксперимента́льно, дает наиболее полную информацию об упругих свойствах материала. Для каждого материала диаграмма выглядит иначе, чем для другого: одни участки на ней могут быть явно выражены, другие — в меньшей степени. В зависимости от этого и проявляется многообразие механических свойств разных материалов.

Однако, тело из любого материала при очень малых деформациях ведет себя как упругое. В то же время почти все тела могут испытывать пластические деформации. Но пределы, в которых эти свойства проявляются, различны. Так, например, резина или сталь обнаруживают упругие свойства до сравнительно больших напряжений и деформаций. Такие материалы называются упругими.

Материалы, у которых незначительные нагрузки вызывают пластические деформации, относятся к числу пластичных.

Большое значение на практике имеет свойство твердых тел, называемое хрупкостью. Тело называют хрупким, если оно разрушается при небольших деформациях. У хрупких тел пластические свойства практически не проявляются.

Рассмотрим теперь **тепловые свойства твердых тел.**

В процессах теплопередачи твердые тела обнаруживают способность к теплопроводности и излучению. При этом лучше всего проводят тепло металлы. Это объясняется наличием в них свободных электронов, которые имеют сравнительную большую длину свободного пробега и могут передавать энергию ионам кристаллической решетки при столкновениях.

При нагревании твердых тел происходит их тепловое расширение. При этом увеличиваются линейные размеры тела, и следовательно, объем тела в целом. Поскольку мы рассматриваем поликристаллические тела, то изменение линейных размеров по всем направлениям происходит в одинаковых пропорциях и форма тела при нагревании не изменяется.

Опыт показывает, что при нагревании твердого тела относительное изменение его длины (или другого линейного размера: высоту, ширины, диаметра и т.п.) прямо пропорционально изменению температуры.

Коэффициент пропорциональности характеризует тепловые свойства данного вещества и называется тепловым коэффициентом линейного расширения. Если говорить об изменении объема тела, то обнаружится точно такая же закономерность: относительное изменение объема прямо пропорционально изменению температуры. Между коэффициентами линейного и объемного расширения имеется простая связь: коэффициент объемного расширения примерно в три раза больше коэффициента линейного расширения у данного вещества.

Линейное расширение

$$\frac{\Delta l}{l_0}=\alpha\Delta t^\circ;$$

$$l-l_0=l_0\cdot\alpha\Delta t^\circ;$$

$$l=l_0\left(1+\alpha\Delta t^\circ\right).$$

Объемное расширение

$$\frac{\Delta V}{V_0}=\beta\Delta t^\circ;$$

$$V-V_0=V_0\cdot\beta\Delta t^\circ;$$

$$V=V_0\left(1+\beta\Delta t^\circ\right).$$

Рассмотрим тепловое расширение куба со стороной l_0.

$$V_0=l_0^3;\qquad V=l^3$$

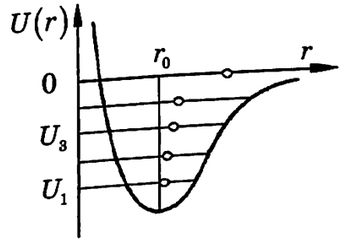
$$l^3=l_0^3\left(1+\alpha\Delta t^\circ\right)^3;$$

$$l^3=l_0^3\left[1+3\alpha\Delta t^\circ+3\alpha^2\left(\Delta t^\circ\right)^2+\alpha^3\left(\Delta t^\circ\right)^3\right];$$

$$l^3=l_0^3\left[1+\left(3\alpha+3\alpha^2\Delta t^\circ+\alpha^3\left(\Delta t^\circ\right)^2\right)\Delta t^\circ\right];$$

$$V=V_0\left(1+\beta\Delta t^\circ\right);$$

$$\beta=3\alpha+3\alpha^2\Delta t^\circ+\alpha^3\left(\Delta t^\circ\right)^2\approx 3\alpha.$$



$$U_3>U_2;$$

$$r_3>r_1.$$

Плавление и кристаллизация твердых тел

Плавление кристаллического вещества:

1. Процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое;

2. Происходит при определенной, характерной для данного вещества температуре;

3. Происходит при постоянном подводе теплоты к телу;

4. Температура плавления зависит от внешнего давления.

Молекулярную картину теплового расширения можно представить следующим образом. При нагревании тела (в интервале температур, ограниченном сверху температурой плавления) увеличивается средняя кинетическая энергия его структурных частиц и, следовательно, полная механическая энергия каждой частицы. Однако, порядок в расположении частиц не нарушается, хотя размах колебаний и увеличивается. Из-за несимметрии кривой, выражающей зависимость энергии молекул от расстояния между ними, положение равновесия, около которого происходят колебания частиц смещается в сторону увеличения расстояний между частицами.

Чем больше температура твердого тела, тем больше среднее расстояние между частицами.

Значения коэффициентов теплового расширения у разных твердых тел различны, но у всех веществ они очень малы. Несмотря на это, во многих случаях это изменение приходится учитывать на практике. Особенно в тех случаях, когда линейные размеры тел велики и сезонные изменения температуры значительны. Это связано с тем, что при расширении или сжатии тел возникают огромные механические напряжения, если другие тела (или части этих же тел) препятствуют изменению размеров.

Важное место среди тепловых явлений занимают процессы агрегатного превращения твердого тела в жидкость и наоборот.

Самой яркой особенностью этого процесса для кристаллического вещества является наличие вполне определенной для каждого вещества **температуры плавления.** Например, при нормальном атмосферном давлении лед плавится при 0°С, нафталин — при 80°С, медь — при температуре 1083°С, а вольфрам — при 3380°С.

Для того, чтобы расплавить данное тело, недостаточно нагреть его до температуры плавления. Чтобы этот процесс произошел, нужно во все время процесса плав-

$$U=\sum_{i=1}^{N}\left(W_{\text{к},i}+W_{\text{п},i}\right)=\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}+\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i};$$

$$\Delta U=\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}\right)+\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right);$$

$$T_{\text{пл}}=\text{const};\quad \Delta T=0;\ \Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}\right)=0$$

$$V_2\approx V_1;\qquad \Delta V\approx 0;\qquad A'\approx 0.$$

Так как $\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right)>0$, то:

$$Q=\Delta U+A'=\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right)>0.$$

$$U=\sum_{i=1}^{N}\left(W_{\text{к},i}+W_{\text{п},i}\right)=\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}+\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i};$$

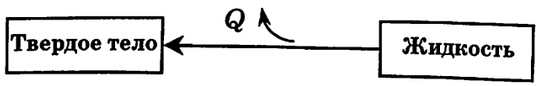
$$\Delta U=\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}\right)+\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right);$$

$$T_{\text{пл}}=\text{const};\quad \Delta T=0;\ \Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{к},i}\right)=0$$

$$V_2\approx V_1;\qquad \Delta V\approx 0;\qquad A'\approx 0.$$

Так как $\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right)<0$, то:

$$Q=\Delta U+A'=\Delta\left(\sum_{i=1}^{N}W_{\text{п},i}\right)<0.$$



кристаллизация

$Q=+\lambda m$ — *для плавления твердого тела,*

$Q=-\lambda m$ — *при кристаллизации жидкости.*

λ — *удельная теплота плавления при данной температуре.*

ления подводить к нему теплоту. Температура тела при этом не меняется, но внутренняя энергия изменяется.

Подводимое к телу количество теплоты расходуется на разрушение его кристаллической решетки, то есть идет на увеличение потенциальной энергии молекул.

Мы уже говорили о том, что в кристаллической решетке модуль потенциальной энергии взаимодействия молекул в среднем значительно больше кинетической энергии теплового движения частиц. Это и обеспечивает существование связанной системы, состоящей из огромного числа частиц.

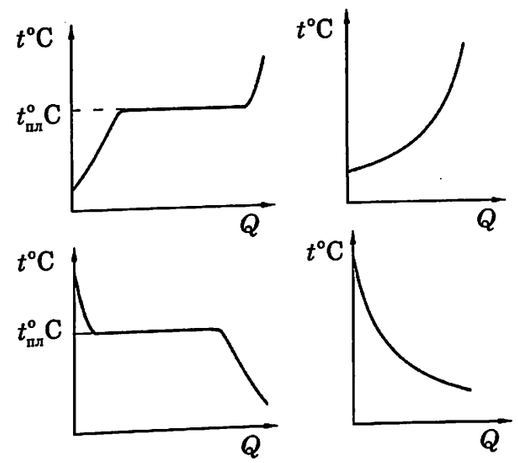
При нагревании до температуры плавления средняя кинетическая энергия молекул увеличивается быстрее, чем потенциальная энергия. При температуре кипения кинетическая и потенциальная энергия частиц твердого тела становятся примерно одинаковыми. Остается только «разрушить порядок» в расположении частиц. Для этого и нужен приток теплоты: все подводимое к телу количество теплоты расходуется на увеличение потенциальной энергии молекул, которые, «разорвав» связи, ранее удерживающие их вблизи определенного положения равновесия, переходят в разупорядоченное состояние, характерное для жидкого состояния.

При этом описанный процесс начинается и происходит одновременно во всех частях твердого тела и происходит (если подвод теплоты продолжается) до тех пор, пока все тело не расплавится.

Следовательно, чтобы расплавить 1 кг твердого кристаллического вещества при температуре плавления, необходимо сообщить ему вполне определенное количество теплоты. Оно называется **удельной теплотой плавления.**

Аморфные тела при нагревании переходят в жидкое состояние постепенно. В той части тела, которая получает тепло непосредственно от нагревателя, молекулы приобретают возможность к более или менее свободному перемещению, как и в жидкости. В то же время в другой части этого тела этого не происходит из-за отсутствия строгого порядка в расположении молекул. Поэтому процесс плавления «растягивается» и приходится на некоторый интервал температур.

Процесс кристаллизации происходит в обратном порядке при той же температуре и сопровождается выделением такого же количества энергии, которое ранее было



затрачено при разрушении кристаллической решетки.

Описанные особенности механизма плавления и кристаллизации вещества находят свое отражение в графике зависимости температуры от времени (или от количества теплоты, которым система обменивается с окружающей средой). На нем появляется горизонтальный участок.

Длина этого участка численно равна количеству теплоты, которое необходимо передать данному телу от нагревателя или отвести от него к холодильнику, чтобы провести данное агрегатное превращение.

У аморфных тел кривая, описывающая процесс плавления имеет вид плавной восходящей или нисходящей кривой.

Рассмотрим теперь основные **электрические свойства** твердых тел, которые обусловили широкое применение этих материлов в современной энергетике, электротехнике, радиотехнике и электронике.

Все твердые тела в зависимости от концентрации свободных электрических зарядов и удельного сопротивления можно разделить на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики.

Каждая из этих групп веществ обладает своими специфическими свойствами, поэтому рассмотрим их по-отдельности.

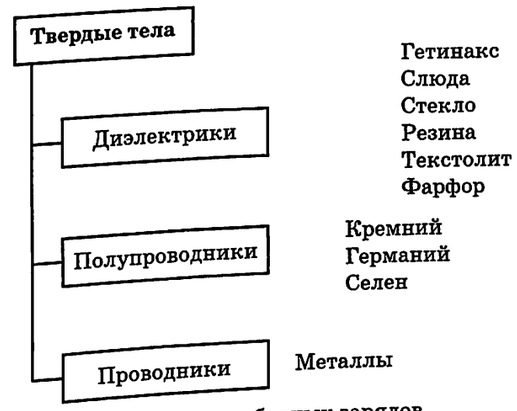
Начнем с рассмотрения электрических свойств металлов, некоторые из которых хорошо известны из курса физики основной школы.

Прежде всего напомним, что при подключении металлического проводника к источнику электрического тока, в цепи возникает электрический ток. Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна приложенному к его концам напряжению. Таким образом, вольтамперная характеристика металла — прямая линия, выходящая из начала координат, отражает закон Ома для участка цепи.

Металлический проводник при протекании по нему тока обнаруживает способность ограничивать значение силы тока в цепи и преобразовывать электрическую энергию во внутреннюю энергию проводника. Физическая величина, которая характеризует эти свойства данного проводника, называется электрическим сопротивлением.

Наконец, нам известно, что в металлических проводниках носителями электрического заряда являются свободные электроны, которые образуются при фор-

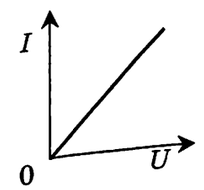
Электрические свойства твердых тел



n — концентрация свободных зарядов

ρ — удельное сопротивление вещества

Твердые тела	n, м$^{-3}$	ρ, Ом·м
Диэлектрики	10^{17}	$10^{8}\ldots 10^{17}$
Полупроводники	Сильно зависят от температуры, освещенности и наличия примесей	
Проводники	10^{28}	$10^{-8}\ldots 10^{-6}$



Вольтамперная характеристика металлического резистора

$$I=\frac{U}{R}$$

Закон Ома для участка цепи

Сопротивление металлического резистора

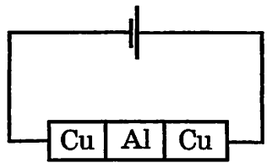
1. Обозначение: R;

2. Ограничивает силу тока в электрической цепи;

3. Преобразует электрическую энергию источника тока во внутреннюю энергию проводника;

4. Численно равно напряжению, которое нужно создать на его концах, чтобы сила тока в резисторе была равна 1 А;

5. Единица сопротивления: ом.



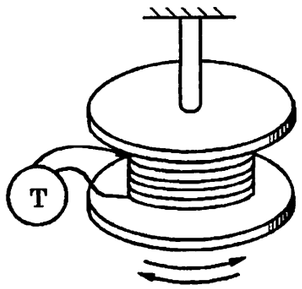
$q = It;$

$q = 0{,}1\ \text{А} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3600)\text{с} = 3{,}2 \cdot 10^6\ \text{Кл};$

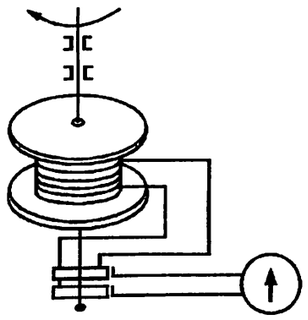
Если ионы однозарядные, то:

$$N = \frac{3{,}2 \cdot 10^6\ \text{Кл}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}} = 2 \cdot 10^{25},$$

что примерно в 100 раз больше числа частиц, содержащихся в 1 моль любого вещества.



В телефоне (Т) слышны были щелчки всякий раз, когда катушка меняла направление движения на противоположное



Направление отклонения стрелки гальванометра при резкой остановке катушки позволяло определить знак заряда носителя тока.

мировании металлической кристаллической решетки.

Это утверждение об электронной проводимости металлов, высказанное нами в виде гипотезы, получило подтверждение в опытах Э. Рике (1901 г.), Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (1912 г.) и Р. Толмена и Т. Стюарта (1916 г.).

В своих опытах Э. Рике проверял гипотезу о том, являются ли носителями электрического заряда в металлах ионы. Для этого он составил электрическую цепь, состоящую из источника тока и трех прижатых друг к другу цилиндров, изготовленных из алюминия и меди. Алюминиевый цилиндр находился между медными.

В течение года через эту цепь тек ток силой 0,1 А, так что общий электрический заряд, перенесенный носителями за это время составил примерно 3,2 миллиона кулон. После проведения опыта цилиндры разъединили и обнаружили, что проникновение атомов меди в алюминий и атомов алюминия в медь не превышают результатов, наблюдающихся при обычной диффузии атомов в твердых телах.

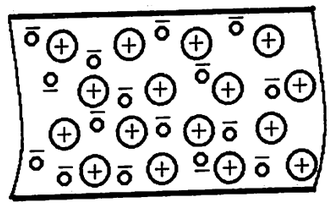
Следовательно, проводимость металлов не связана с перемещением вдоль проводника ионов данного вещества.

В опытах Мандельштама и Папалекси проверялась следующая идея. Если в металле имеются свободные заряженные частицы, то при резком изменении скорости металла, свободные частицы некоторое время будут продолжать движение в прежнем направлении. Тогда переднем конце проводника при его торможении будут скапливаться носители заряда, а между концами проводника возникнет разность потенциалов, которую можно обнаружить.

Для опыта использовалась катушка, концы которой замыкались на телефон. Катушка приводилась во вращательно-колебательное движение вокруг своей оси. В моменты смены направления вращения в телефоне раздавались щелчки, отмечавшие наличие электроинерционных эффектов.

В опытах Толмена и Стюарта проводились измерения удельного заряда носителей электрического тока в металлах.

Концы катушки, намотанной металлическим проводом, с помощью подвижных контактов замыкались на чувствительный гальванометр. Катушка приводилась в быстрое вращение, а затем резко останавливалась. В момент торможения свободные



Основные представления классической электронной теории металлов

1. Металлы имеют кристаллическую решетку, в узлах которой находятся положительно заряженные ионы;

2. Ионы колеблются около положений равновесия и не могут свободно перемещаться;

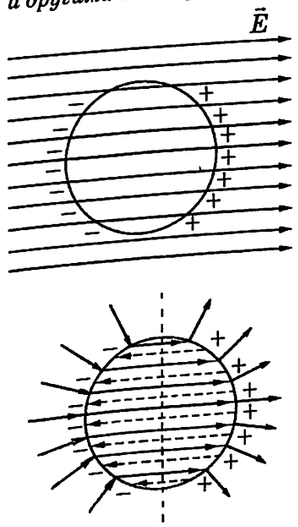
3. Между ионами кристаллической решетки движутся свободные электроны (электроны проводимости);

4. Движение электронов проводимости подчиняется законам классической механики;

5. В отсутствие электрического поля электроны проводимости движутся хаотично, совершая тепловое движение («электронный газ»);

6. Электрическое поле, действуя на электроны одинаковой по значению и направлению силой, приводит к появлению «дрейфа» хаотически движущихся электронов вдоль проводника. Это и есть упорядоченное движение, называемое электрическим током;

7. При движении электроны испытывают соударения с ионами кристаллической решетки и другими электронами.



В электрическом поле внутри металла происходит перераспределение зарядов. В результате внутри проводника возникает собственное электрическое поле, которое компенсирует внешнее. Движение зарядов прекращается. Силовые линии внешнего поля (в результате суперпозиции полей) перпендикулярны поверхности проводника.

заряженные частицы продолжали движение в течение некоторого времени, создавая ток через гальванометр.

Направление отклонения стрелки позволяло определить знак носителей заряда. Он оказался отрицательным. Среднее значение силы тока через гальванометр позволяло определить удельный заряд носителей. Он в пределах экспериментальных ошибок совпал с известным в то время удельным зарядом электрона.

Так было доказано, что носителями электрического заряда в металлах являются свободные электроны.

Тогда можно предложить следующую модель строения кристаллической металлической решетки. В узлах кристаллической решетки находятся положительно заряженные ионы, а между ними находятся свободные (то есть не принадлежащие какому-либо конкретному иону) электроны.

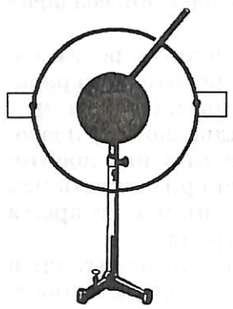
Свободные электроны при отсутствии электрического поля совершают тепловое движение между ионами кристаллической решетки и средняя скорость упорядоченного движения в каком-либо направлении равна нулю. Это означает, что проводник является электрически нейтральным и электрическое поле внутри него равно нулю.

Если проводнику сообщить электрический заряд, то электростатическое поле внутри проводника будет равно нулю и весь статический заряд проводника расположится на его поверхности. Покажем это.

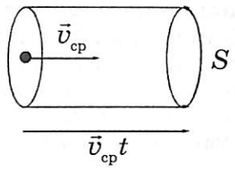
Допустим, что электростатическое поле внутри проводника существует. Тогда, действуя на свободные электроны, оно приводило бы их в движение в определенном направлении, то есть создавало бы ток. Это, в свою очередь, приводило бы к нагреванию проводника, чего в действительности не происходит. Следовательно, внутри проводника электростатическое поле отсутствует.

Если теперь воспользоваться теоремой Гаусса, выбирая любую замкнутую поверхность внутри проводника, то поток напряженности через нее будет равен нулю, так как равна нулю напряженность электрического поля. Следовательно, и заряд внутри этой поверхности равен нулю.

Если металлическое тело поместить в электростатическое поле, то в нем возникнет кратковременный ток, приводящий к перераспределению электрических зарядов



Опыт, при помощи которого Г. Кавендиш доказал, что заряд проводника целиком распределяется по его внешней поверхности.
Заряженный шар, помещенный внутрь незаряженной металлической сферы, соединяли со сферой проволокой. Затем сфера удалялась и измерялся заряд шара. Он оказался равным нулю.



q_e – заряд носителей;
n – концентрация носителей;
$\vec{v}_{ср}$ – скорость упорядоченного движения;
S – площадь поперечного сечения.

$V = v_{ср}tS$ – все свободные носители заряда из этого объема проводника за время t пересекут сечение S.

$N = nV = nv_{ср}tS$ – число свободных носителей, имеющихся в объеме V.

$q = q_e \cdot N = q_e n v_{ср} tS$ – заряд, перенесенный носителями через поперечное сечение за время t.

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_e n v_{ср} tS}{t} = q_e n v_{ср} S$$

τ – среднее время между последовательными столкновениями электрона с ионами кристаллической решетки;

$\vec{F}_{эл} = m\vec{a}; \qquad \vec{F}_{эл} = q_e\vec{E};$

$m\vec{a} = q_e\vec{E}; \qquad \vec{a} = \frac{q_e}{m}\vec{E}; \quad a_x = \frac{q_e}{m}E_x = \frac{q_e}{m}E;$

$v_{ср} = \frac{v_{0x} + v_{к,x}}{2} = \frac{a_x\tau}{2} = \frac{q_e}{2m}E\tau;$

$I = q_e n \cdot \frac{q_e}{2m}E\tau \cdot S;$

$U = El;$

$I = \frac{q_e^2 n\tau}{2m} \cdot \frac{U}{l} \cdot S = \frac{q_e^2 n\tau}{2m} \cdot \frac{S}{l} \cdot U = \frac{U}{R};$

внутри проводника (электростатическая индукция). Это перераспределение происходит до тех пор, пока поле, созданное появившимися на поверхности проводника зарядами не скомпенсирует внешнее.

По принципу суперпозиции результирующее поле внутри проводника будет равно нулю и упорядоченное движение зарядов прекратится. Отсюда вытекает, что линии напряженности внешнего электрического поля после перераспределения зарядов внутри проводника будут располагаться перпендикулярно его поверхности.

Тогда можно предложить следующую **модель электрического тока** в металлах. Если к концам проводника приложить напряжение, то внутри него образуется стационарное электрическое поле.

Под действием электрического поля заряды приобретают ускорение, направленное вдоль силовой линии поля в противоположную сторону. В результате возникает «упорядоченное» движение зарядов, приводящее к тому, что через любое поперечное сечение проводника переносится электрический заряд, то есть возникает ток.

Пользуясь этой моделью, найдем силу тока в металлическом проводнике, считая известными его размеры, концентрацию электронов в данном металле и напряжение, приложенное к его концам.

Скорость упорядоченного движения электронов увеличивается в течение всего времени его движения от одного столкновения с ионом кристаллической решетки до другого столкновения.

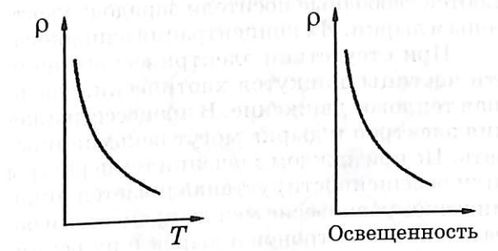
Таким образом, если известно напряжение на концах проводника и его длина, то можно рассчитать напряженность электрического поля, а по ней ускорение движения электрона. Считая, что начальная скорость упорядоченного движения электрона равна нулю, можно рассчитать среднюю скорость этого движения, предполагая, что между столкновениями проходит некоторое среднее время τ. Тогда по определению силы тока получим: сила тока прямо пропорциональна напряженности электрического поля в проводнике. Используя связь между напряженностью поля и напряжением между двумя его точками , получим закон Ома для участка цепи. Коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением зависит от рода вещества (а точнее от концентрации электронов и среднего времени между столкновения-

$$R \equiv \frac{2m}{q_e^2 n\tau} \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{S};$$

$$[\rho] = \left[\frac{2m}{q_e^2 n\tau}\right] = \frac{кг \cdot м^3}{Кл^2 \cdot с} = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} \cdot \frac{м \cdot с}{Кл^2} = Дж \cdot \frac{м \cdot с}{Кл^2} =$$

$$= \frac{Дж}{Кл} \cdot м \cdot \frac{с}{Кл} = \frac{В \cdot м}{А} = Ом \cdot м.$$

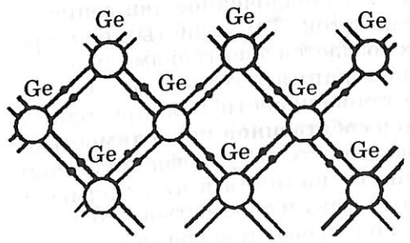
Электрические свойства полупроводников



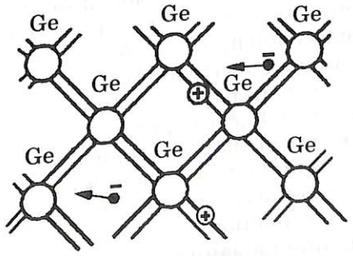
При повышении температуры или освещенности удельное сопротивление полупроводника может уменьшаться в 1000 ... 100000 раз.

При комнатной температуре в 1 см³ германия:

$n_e \approx 3 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$; $\quad n_{атомов} \approx 10^{23}$ см$^{-3}$.



Связь атомов в кристаллической решетке полупроводника обеспечивается валентными электронами, образующими парноэлектронные (ковалентные) связи.



Электрон, разорвавший связь, становится свободным. Вакантное место в связи называется «дыркой».

ми), заряда и массы электрона, а также от длины и площади поперечного сечения проводника.

Таким образом, предложенная нами модель тока позволяет получить зависимость между силой тока в участке цепи от напряжения, приложенного к его концам, которая подтверждается многочисленными опытами.

Рассмотрим теперь электрические свойства **полупроводников**.

Как уже говорилось удельное сопротивление и концентрация носителей заряда в этой группе веществ сильно зависит от температуры, освещенности и наличия примесей. График зависимости удельного сопротивления типичного полупроводника изображен на рисунке. Видно, что при низких температурах удельное сопротивление очень велико и вещество ведет себя как диэлектрик. Но при повышении температуры удельное сопротивление быстро падает. Отсюда и название этой группы веществ.

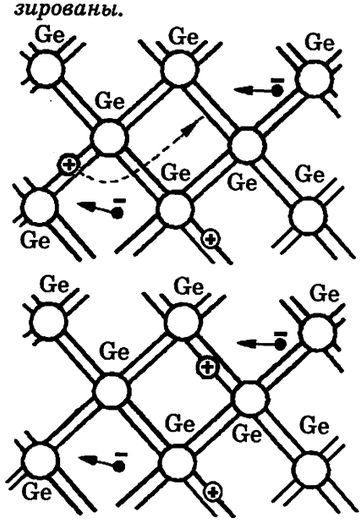
Понять причину увеличения электропроводности полупроводника с ростом температуры, а заодно и узнать, какие частицы являются носителями заряда в них, поможет рассмотрение его кристаллической решетки.

Кристаллы полупроводников имеют атомную (ковалентную) решетку. Плоская схема структуры кристалла германия показана на рисунке. Четыре валентных электрона каждого атома германия участвуют в образовании парных ковалентных связей с четырьмя соседними атомами. Эти электроны коллективизируются кристаллической решеткой и, хотя не становятся свободными как электроны металлов, но в своем движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами.

Такие связи между атомами называются **парноэлектронными**. Они довольно прочные и при низких температурах практически не разрываются. Именно поэтому при низких температурах концентрация свободных электронов (освободившихся при разрыве связи) чрезвычайно мала, и германий не проводит электрический ток.

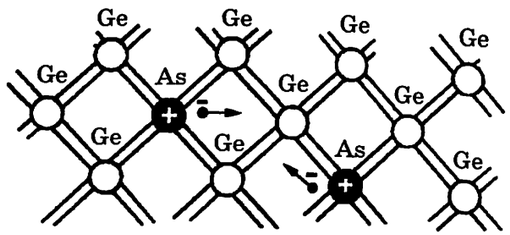
При нагревании германия средняя энергия электронов, образующих парноэлектронные связи увеличивается и у некоторых из них может оказаться достаточной, чтобы разорвать связь. В таком случае электрон становится свободным, а в связи появляется свободное (вакантное) место.

Электроны в парноэлектронных связях принадлежат кристаллу в целом — коллективизированы.



Вакантное место — дырка при отсутствии электрического поля «блуждает» по кристаллу, так как электроны связи при движении могут заполнять вакантное место.

Собственная проводимость полупроводника реализуется движением электронов и дырок, концентрация которых одинакова и остается примерно постоянной при неизменных внешних условиях (при неизменной температуре и освещенности).



При $n_{As} = 10^{-7} \cdot n_{Ge}$ (один атом мышьяка на 10000000 атомов германия):

$$n_{e,\text{ примесь}} = 10^{-7} \cdot 10^{23}\ \text{см}^{-3} = 10^{16}\ \text{см}^{-3};$$

то есть примерно в тысячу раз больше, чем в чистом германии

$$\frac{n_{e,\text{ примесь}}}{n_e} = \frac{10^{16}\ \text{см}^{-3}}{10^{13}\ \text{см}^{-3}} = 10^3.$$

Примесь мышьяка в германии является донорной, так как отдает кристаллу столько свободных электронов, сколько атомов примеси внесено в полупроводник.

Поскольку электроны парноэлектронных связей коллективизированы, то данное вакантное место может замещаться другими электронами. В этом случае вакантное место мигрирует по кристаллической решетке в сторону, противоположную движению электрона. Можно сказать, что оно ведет себя как положительно заряженная частица. Ее называют «дыркой».

Таким образом, при нагревании (или при освещении полупроводника — из-за внутреннего фотоэффекта) в кристалле появляются свободные носители зарядов: электроны и дырки. Их концентрация одинакова.

При отсутствии электрического поля эти частицы движутся хаотически, совершая тепловое движение. В процессе движения электрон и дырка могут рекомбинировать. Но при каждом значении температуры (или освещенности) устанавливается динамическое равновесие между процессами образования электронов и дырок и их рекомбинацией, так что концентрация свободных носителей заряда остается постоянной при неизменных внешних условиях.

Если теперь приложить к концам полупроводника напряжение, то под действием электрического поля электроны и дырки придут в упорядоченное движение, то есть создадут ток. Ток в чистых полупроводниках создается электронами и дырками, концентрация которых одинакова. Этот вид проводимости полупроводника называется **собственной проводимостью.**

Проводимость полупроводников сильно зависит от наличия в них примесей. Именно этот факт и способствовал бурному развитию полупроводниковой электроники.

Наличие примесей приводит к появлению дополнительных свободных носителей в полупроводниках и их концентрацией можно управлять, меняя концентрацию примесей. Механизм проводимости полупроводников при наличии в них примесей называется примесной проводимостью. Она бывает двух типов: электронной (или проводимостью *n*-типа) и дырочной (или проводимостью *p*-типа). Рассмотрим механизм несобственной, примесной проводимости.

На рисунке показана плоская схема структуры кристалла германия, в которую внесены примеси мышьяка.

Атомы мышьяка занимают место некоторых атомов германия в кристалле, и их валентные электроны также образуют парноэлектронные связи с соседними атомами

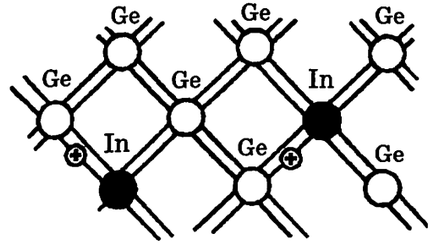
При наличии донорной примеси проводимость полупроводника также реализуется движением электронов и дырок. Но концентрация электронов (основные носители заряда) в данном случае больше концентрации дырок (неосновные носители заряда):

$$n_- = n_{e,\text{ собств.}} + n_{e,\text{ донор}};$$

$$n_+ = n_{\text{дырок, собств.}};$$

$$n_- > n_+.$$

Полупроводник с донорной примесью называется полупроводником n-типа.



Примесь индия в германии является акцепторной, так как образует в кристалле столько вакантных мест в связях — дырок, сколько атомов примеси внесено в полупроводник.

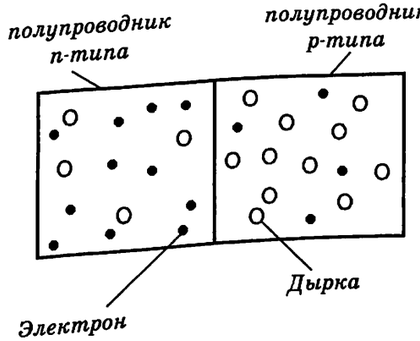
При наличии акцепторной примеси проводимость полупроводника также реализуется движением электронов и дырок. Но концентрация электронов (неосновные носители заряда) в данном случае меньше концентрации дырок (основные носители заряда):

$$n_- = n_{e,\text{ собств.}};$$

$$n_+ = n_{\text{дырок, собств.}} + n_{\text{дырок, акцептор}};$$

$$n_- < n_+.$$

Полупроводник с акцепторной примесью называется полупроводником p-типа.



кристаллической решетки. Но поскольку у атома мышьяка не четыре, а пять валентных электронов, то пятый валентный электрон в образовании связи не участвует. Он слабо связан со своим атомом и практически при любых температурах разрывает связь с атомом и становится свободным. Число этих дополнительных электронов проводимости равно числу атомов мышьяка, внедренных в кристалл германия.

Такая примесь получила название **донорной.** Основными носителями в полупроводнике с донорной примесью являются электроны, а дырки (которые образуются точно так же, как было описано выше) являются неосновными, так как их концентрация заметно ниже.

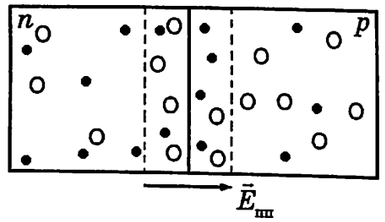
Совершенно аналогично образуется дырочная проводимость у полупроводника, в который внесены примеси атомов, имеющих меньшее число валентных электронов. Например, при введении в кристалл германия трехвалентных атомов индия три валентных электрона участвуют в образовании парноэлектронной связи, а вместо недостающего четвертого электрона в связи образуется вакансия — дырка. Теперь число «примесных» дырок равно числу внедренных в кристалл атомов примеси и значительно превышает число основных носителей полупроводника. Проводимость полупроводника в этом случае дырочная, а примесь называется **акцепторной.**

Вводя в чистый полупроводник примеси, можно управлять концентрацией носителей заряда, но наибольший интерес с практической точки зрения представляют явления, происходящие на границе раздела полупроводников с разным типом проводимости. Рассмотрим эти явления более подробно.

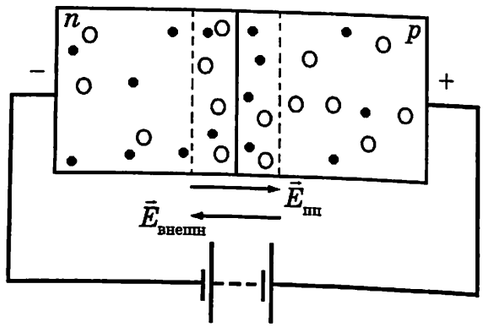
Приведем в контакт (не механический, а на молекулярном уровне) полупроводники *n*- типа и *p*-типа.

Так как электроны и дырки совершают тепловое движение и концентрация этих носителей в этих полупроводниках различна, то на границе раздела происходит диффузия: из полупроводника *p*-типа диффундируют преимущественно дырки, а из полупроводника *n*-типа — преимущественно электроны.

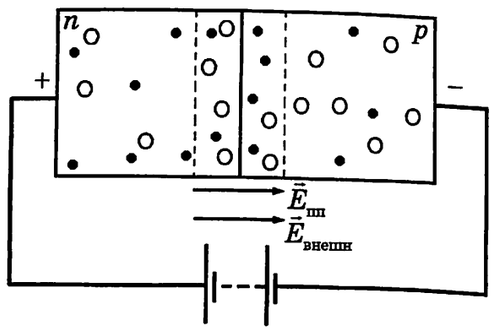
В начале процесса каждый из полупроводников был электрически нейтральным. Теперь из-за диффузии *p*-полупроводник «лишился» части дырок и приобрел неко-



Из-за диффузии основных носителей через контакт полупроводников разных типов вблизи границы образуется «запирающий слой» — электрическое поле созданное электронами и дырками, которые продиффундировали через границу и зарядили разноименно соответствующие части системы из двух полупроводников.



Когда к полупроводнику p-типа присоединен положительный полюс источника тока, а к полупроводнику n-типа — отрицательный, то внешнее поле способствует переходу основных носителей каждого полупроводника через границу полупроводников. Запирающий слой исчезает.



Если поменять полярность батареи, то внешнее поле, как и поле запирающего слоя, препятствует движению основных носителей через контакт полупроводников. Ток через него осуществляется неосновными носителями, концентрация которых пренебрежимо мала.

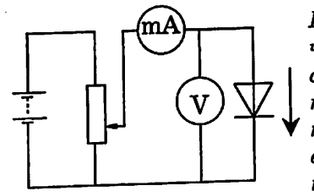
торое количество электронов. Следовательно, зарядился отрицательно.

Полупроводник *n*-типа, напротив, лишился части электронов и приобрел «лишние» дырки. Следовательно, зарядился положительно. Таким образом, в тонком слое вблизи границы раздела полупроводников двух типов самопроизвольно происходит перераспределение свободного заряда, которое приводит к образованию электрического поля. Это поле направлено так, что препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок через границу (говорят, образуется «запирающий слой»). Поэтому при неизменных внешних условиях устанавливается динамическое равновесие: число дырок и электронов, мигрирующих через границу в любом направлении оказывается примерно одинаковым. При этом толщина запирающего слоя или область пространства, в которой имеется электрическое поле, образованное диффузией основных носителей каждого типа полупроводника, остается неизменным во времени.

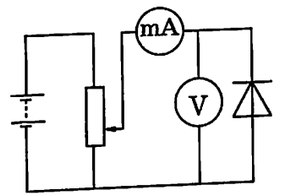
Если теперь подключить такую систему полупроводников к источнику постоянного тока, то результат будет зависеть от порядка подключения его полюсов. Рассмотрим оба варианта подключения.

Допустим, что к полупроводнику *p*-типа подключен положительный полюс источника тока, а к полупроводнику *n*-типа — отрицательный. Тогда направление поля, созданного источником тока в полупроводниках таково, что способствует движению основных носителей заряда через границу раздела. Поскольку в обычных случаях напряженность поля, созданного источником тока значительно превышает напряженность поля запирающего слоя, то в цепи, содержащей полупроводник, потечет ток, созданный движением основных носителей. Поэтому сила тока будет довольно большой.

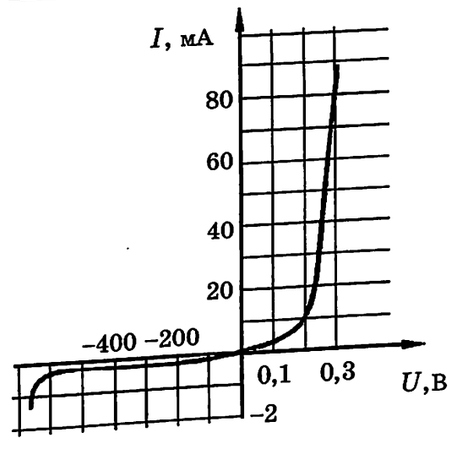
Если поменять полярность источника тока, то электрическое поле внутри системы полупроводников поменяет свое направление. Теперь оно имеет такое же направление, что и направление поля в запирающем слое, следовательно, препятствует переходу основных носителей через границу *p-n*-перехода. Ток через нее осуществляется неосновными носителями, концентрация которых в тысячи раз меньше. Но это значит, что при том же значении напряжения сила тока через систему двух полупроводников в этом

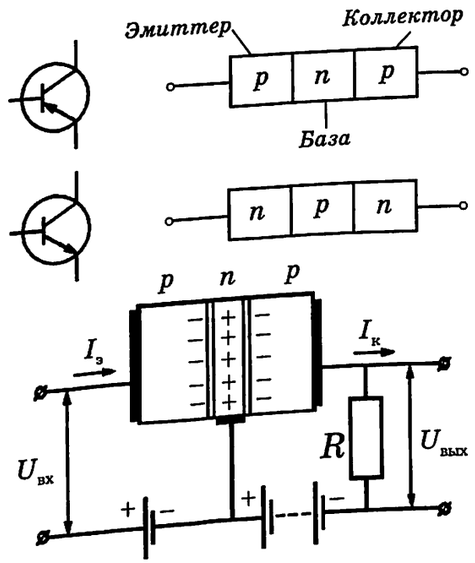


В этой схеме ток через диод осуществляется основными носителями каждого полупроводника — прямой ток.



В этой схеме ток через диод практически равен нулю, так как осуществляется неосновными носителями — обратный ток.





направлении в тысячи раз меньше, чем в предыдущем случае.

Следовательно, через контакт двух разнородных полупроводников ток течет в одном направлении и практически отсутствует в другом. То есть здесь мы имеем дело с ситуацией, похожей на ситуацию с односторонней проводимостью вакуумного диода. Поэтому система двух полупроводников или *p-n*-переход также получил название диода, только полупроводникового.

Для получения вольтамперной характеристики полупроводникового диода используют уже известную вам схему.

Меняя полярность батареи, можно исследовать зависимость тока прямого и обратного направления в зависимости от приложенного напряжения.

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода приведена на рисунке. В отличие от характеристики вакуумного диода, у которого значение обратного тока строго равно нулю, у полупроводникового диода обратный ток не равен нулю, но меньше прямого в тысячи раз при тех же значениях напряжения.

Полупроводниковые диоды сравнительно просты в изготовлении и могут работать в довольно широком диапазоне сил токов. Диоды, рассчитанные на малые силы токов обычно используют в радиотехнических устройствах — радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах и т.п. И здесь они практически полностью вытеснили электровакуумные диоды.

Диоды, рассчитанные на большие токи, используют для выпрямления переменного тока на тяговых подстанциях, питающих троллейбусы, трамваи и поезда метро и электрички, а также в электрометаллургии, где проводится электролиз.

Компактность и малая масса, отсутствие дополнительных цепей накала, возможность работать при малых значениях напряжения и большой (до 50%) кпд — вот основные преимущества полупроводникового диода перед вакуумным. Это и привело к быстрой замене электровакуумных устройств на полупроводниковые аналоги.

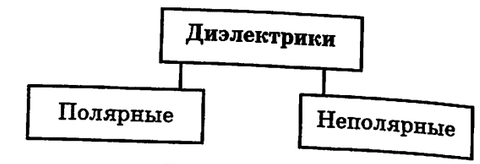
В более сложных полупроводниковых устройствах (например, транзисторах) используют два *p-n*-перехода. На рисунках приведены условные обозначения и схема включения транзистора, позволяющая проводить усиление тока, а значит и напряжения, на выходе электрической цепи.

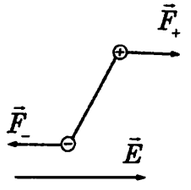
Электрические свойства диэлектриков

Вещество	ε	$E_{пробоя}$, кВ/мм
Бумага	3,4 ... 3,7	250 ... 300
Мрамор	8 ... 10	2 ... 4
Оргстекло	3,5 ... 3,9	15 ... 25
Резина	3,0 ... 6,0	15 ... 25
Слюда	5,7 ... 7,2	100 ... 300
Стекло	6,0 ... 10,0	10 ... 15
Текстолит	6,0 ... 8,0	10 ... 16
Фарфор	4,4 ... 6,8	30
Эбонит	2,7 ... 3,5	15 ... 20

Если к металлическому диску, закрепленному на стержне заряженного электрометра поднести пластину из диэлектрика, например, из органического стекла, то стрелка электрометра приближается к стержню.

Это может произойти лишь в случае, когда диэлектрик сам создает электрическое поле, действие которого приводит к перераспределению зарядов в стержне и диске электрометра, уменьшая заряд стрелки и увеличивая заряд диска.





Пара сил, действующая на диполь в электрическом поле, стремится повернуть его так, чтобы ось диполя лежала вдоль линии напряженности поля.

Обратимся теперь к краткому обзору электрических свойств диэлектриков. Как уже отмечалось, у диэлектриков концентрация свободных заряженных частиц в среднем составляет 10^{17} м$^{-3}$, что примерно в 100 раз меньше, чем у полупроводников при сравнительно низких температурах. Поэтому сила тока в них даже при большой разности потенциалов практически равна нулю. Однако, в очень сильных электрических полях может происходить расщепление молекул диэлектриков на ионы. В этом случае происходит пробой диэлектрика. В таблице указаны значения напряженности электрических полей, при которых происходит пробой некоторых диэлектриков.

В этой же таблице приведены значения диэлектрической проницаемости этих веществ — еще одной важной характеристики диэлектриков, характеризующей их способность влиять на электрическое поле, в котором они находятся.

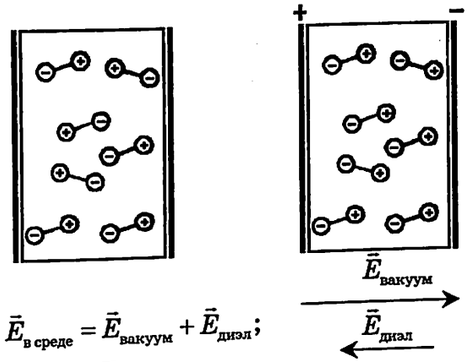
При изучении электростатики мы отмечали это важное свойство диэлектриков. Простые опыты позволяют убедиться в том, что помещенный в электрическое поле диэлектрик, оставаясь нейтральным, создает собственное электрическое поле, напряженность которого направлена противоположно напряженности внешнего поля. То есть, по принципу суперпозиции, всегда ослабляет электрическое поле.

Теперь мы можем объяснить этот факт, используя знания о строении вещества. Диэлектрики можно разделить на две группы: полярные и неполярные.

У полярных диэлектриков молекулы представляют собой диполи. У неполярных диэлектриков центры положительных и отрицательных зарядов атомов или молекул совпадают.

Если поместить диэлектрик во внешнее электрическое поле, то происходит его поляризация. Механизм поляризации у полярных и неполярных диэлектриков имеет некоторые различия.

Дипольные молекулы полярного диэлектрика, расположенные в отсутствие поля хаотически, в электрическом поле ориентируются. Пара сил, действующая на заряды диполя, стремится так повернуть диполь, чтобы его ось была направлена вдоль силовой линии поля. Однако, тепловое движение молекул препятствует этому. Поэтому при обычных температурах реализуется состояние, при котором в среднем



$$\vec{E}_{в\ среде} = \vec{E}_{вакуум} + \vec{E}_{диэл};$$

$$\varepsilon = \frac{E_{вакуум}}{E_{в\ среде}};$$

$$\varepsilon \geq 1.$$

Любая среда (диэлектрик) ослабляет электрическое поле, созданное электрическим зарядом в отсутствие среды (в вакууме).

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз напряженность однородного электрического поля в вакууме больше напряженности поля, созданного той же системой зарядов в диэлектрике.

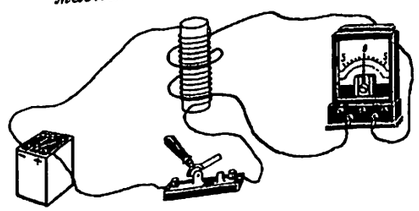
Магнитные свойства вещества

$$\mu = \frac{B_{в\ среде}}{B_{в\ вакууме}} \equiv \frac{B}{B_0};$$

$$\vec{B}_{в\ среде} = \mu \vec{B}_{в\ вакууме}; \qquad \vec{B} = \mu \vec{B}_0$$

Вещество	Магнитная проницаемость
Парамагнетик	$\mu > 1$
Диамагнетик	$\mu < 1$
Ферромагнетик	$\mu >> 1$

Установка для измерения магнитной проницаемости вещества



число диполей, ориентированных вдоль поля оказывается больше числа диполей, ориентированных против поля.

При этом на противоположных торцах диэлектрика, перпендикулярных линиям напряженности электрического поля, появляются связанные электрические заряды противоположного знака.

Они-то и создают внутри диэлектрика поле, линии напряженности которого направлены противоположно линиям напряженности внешнего поля.

Внутри диэлектрика отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга и средний электрический заряд диэлектрика равен нулю.

При внесении в поле неполярного диэлектрика также происходит его поляризация. Но в этом случае электрическое поле «растягивает» положительно и отрицательно заряженные частицы атомов и молекул, превращая их в диполи, которые уже ориентированы вдоль линий внешнего поля.

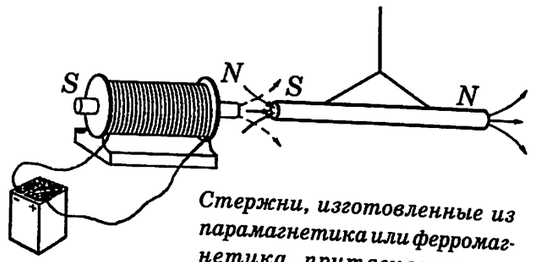
В результате этого процесса на соответствующих торцах диэлектрика также возникают связанные заряды, хотя суммарный электрический заряд диэлектрика по-прежнему равен нулю.

Рассмотрим теперь **магнитные свойства** вещества. Подобно тому, как вещество обладает способностью влиять на электрическое поле, оно оказывает воздействие и на магнитное поле. Так вещество обнаруживает свои магнитные свойства.

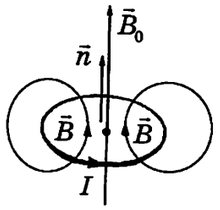
Магнитное поле образуется токами и постоянными магнитами, которые могут быть изготовлены лишь из некоторых веществ. Согласно гипотезе А. Ампера, внутри этих веществ имеются микроскопические токи. Искать их надо внутри атомов и молекул вещества.

Электроны, движущиеся в атомах, создают в окружающем пространстве магнитное поле. Атом при этом можно рассматривать как элементарный кольцевой ток, который при помещении во внешнее магнитное поле будет ориентироваться в нем. Этот механизм обусловливает магнитные свойства первой группы веществ, которые получили название **парамагнетиков**.

В парамагнетиках элементарные круговые токи ориентируются так, чтобы нормаль к ним была направлена вдоль линий магнитной индукции намагничивающего поля. Следовательно, в парамагнетиках магнитное поле увеличивается по сравне-



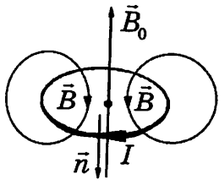
Стержни, изготовленные из парамагнетика или ферромагнетика, притягиваются к сердечнику электромагнита. Значит, элементарные токи в них направлены так же, как и ток в обмотке электромагнита.



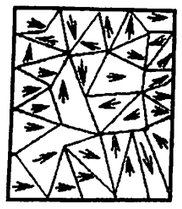
В парамагнетиках нормаль к контуру «элементарного тока» располагается параллельно и в том же направлении, что и внешнее поле. Происходит усиление внешнего магнитного поля.

Стержни, изготовленные из диамагнетика отталкиваются от сердечника электромагнита.

Значит, элементарные токи в них направлены в сторону, противоположную направлению тока в обмотке электромагнита.



В диамагнетиках нормаль к контуру «элементарного тока» располагается параллельно и в противоположном внешнему полю направлении. Происходит ослабление внешнего магнитного поля.



Домены — области спонтанной намагниченности ферромагнетика — имеют объем около 10^{-6} см^3, а длина может достигать 2 ... 3 мм. Следовательно, это — макроскопические образования.

нию с тем же полем в вакууме. Тепловое движение атомов препятствует правильной ориентации токов, поэтому эффект от увеличения внешнего поля очень незначителен. А после снятия поля магнитное поле парамагнетика очень быстро исчезает.

Поскольку в каждом атоме (кроме атома водорода) число электронов больше единицы, то и магнитное поле атома создается движением всех электронов. Имеется значительная группа атомов, в которых элементарные токи имеют такую конфигурацию, что созданные ими магнитные поля взаимно компенсируют друг друга.

Но и эти вещества — их называют **диамагнетиками** — обнаруживают магнитные свойства. Это связано с явлением электромагнитной индукции.

В момент включения магнитного поля в пространстве возникает вихревое электрическое поле. Оно и действует на электроны внутри атомов, закручивая их вокруг магнитных силовых линий. На существовавшее ранее движение электронов накладывается еще дополнительное вращение, причем на все электроны это действие вихревого поля одинаково. Оно направлено так, чтобы препятствовать увеличению магнитного поля, вызвавшего появление вихревого электрического поля. Поэтому в диамагнетиках внешнее магнитное поле ослабляется.

После того, как внешнее магнитное поле перестало изменяться, это дополнительное вращение электронов не прекращается, так как движению электронов в атоме ничто не оказывает сопротивления.

Когда внешнее поле «исчезает», этот же эффект снова происходит, но теперь электроны «закручиваются» вихревым полем в обратную сторону и, в конце концов, «останавливаются», так что индукционные токи исчезают и диамагнетик оказывается размагниченным.

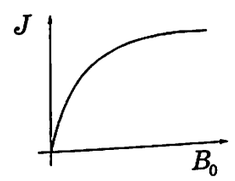
Наконец, магнитные свойства третьей группы веществ — **ферромагнетиков** — связаны со спином электронов, а не с их движением внутри атомов. Таким образом, ферромагнетизм — явление квантовое, и наблюдается оно только при определенной структуре атомной оболочки атома и определенном строении кристаллической решетки вещества. Вот почему ферромагнетиков в природе существует немного.

Исследования показали, что внутри ферромагнетика существуют небольшие

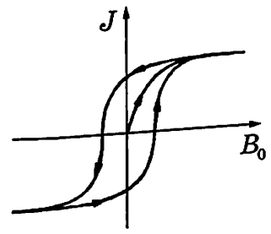
Ферромагнетик	μ_{max}	$T_{Кюри}$, °C
Железо	680000	768
Кобальт	175	1131
Никель	1120	358
Сталь (трансформаторная)	8000	500
Пермаллой	12000 ... 300000	580
Супермаллой	1000000	420
Пермендюр	4500	980

Намагниченность, J — физическая величина, характеризующая магнитное состояние ферромагнетика: $J = B - B_0$;

$$J = \mu B_0 - B_0 = (\mu - 1)B_0$$



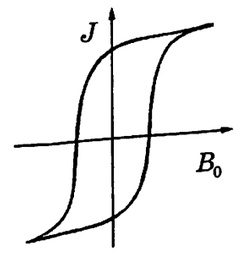
При увеличении внешнего магнитного поля намагниченность ферромагнетика растет вплоть до насыщения, когда все элементарные токи ориентированы «по полю».

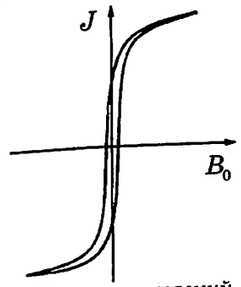


«Петля гистерезиса» — «петля отставания» — показывает, что при уменьшении индукции внешнего поля после достижения насыщения намагниченность образца уменьшается медленнее, чем происходил ее рост.

- *Постоянные магниты*
- *Сердечники электромагнитов*
- *Сердечники трансформаторов*
- *Магнитные пленки для записи информации*

Магнитно-жесткий ферромагнетик





Магнитно-мягкий ферромагнетик

области — их называют **доменами** — в которых наблюдается вполне определенная ориентация спинов. То есть это области спонтанной намагниченности.

В разных доменах индукции магнитных полей имеют различные направления, и в большом кристалле их поля взаимно компенсируют друг друга.

Размеры доменов зависят от многих факторов (химического состава вещества, дефектов кристаллической структуры, температуры), но все они — макроскопические образования, содержащие огромное число атомов. Таким образом ферромагнетизм — это не свойство отдельных атомов некоторых веществ, а свойство образца в целом.

Все ферромагнетики при нагревании до определенной, характерной для каждого вещества температуры утрачивают ферромагнитные свойства. Эта температура называется температурой Кюри. При этой температуре в доменах нарушается строгая ориентация спинов и вещество становится парамагнетиком.

Ферромагнетики намагничиваются по направлению поля и значение их магнитной проницаемости значительно больше единицы. Кроме того, ферромагнетики обладают остаточным магнетизмом, то есть становятся постоянными магнитами.

Если ненамагниченный образец ферромагнетика поместить в магнитное поле и постепенно увеличивать его индукцию, то намагниченность (разность между значением индукции поля в образце и того же поля в вакууме) образца постепенно увеличивается, пока не достигнет насыщения. Дальнейшее увеличение внешнего поля не приводит к увеличению намагниченности данного образца (все домены ориентированы).

Если теперь начать уменьшать внешнее поле, то намагниченность образца, хотя и уменьшается, но значительно медленнее, так что в отсутствие внешнего поля остаточная намагниченность оказывается весьма значительной. Чтобы размагнитить этот образец, придется приложить поле противоположного направления. В результате, график зависимости намагниченности от индукции внешнего магнитного поля имеет довольно сложный характер. Он называется «петлей гистерезиса» (от греческого hysteresis — отставание).

Различные материалы имеют разные формы петли гистерезиса. Это обусловливает их разное практическое применение.

Содержание

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА 3

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА 3

§ 1. СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА 4

§ 2. ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА – БОРА 9

§ 3. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА АТОМАМИ. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 13

§ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ 16

§ 5. ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА. КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ 20

§ 6. ЛАЗЕРЫ — КВАНТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА 25

§ 7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СТРОЕНИЕ АТОМА» 27

§ 8. ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ. СВОЙСТВА ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ 33

§ 9. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА 38

§ 10. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ПРОТОН И НЕЙТРОН — СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ЯДРА 42

§ 11. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ИЗОТОПЫ. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ 46

§ 12. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ 49

§ 13. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ 52

§ 14. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ 56

§ 15. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ 60

§ 16. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ 64

§ 17. ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ 68

§ 18. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА» 72

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 77

ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЧТЕНИЯ 78

§ 19. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ 78

§ 20. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ 83

§ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ 87

§ 22. СТРУКТУРА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. КВАРКИ 90

МОЛЕКУЛЯРНО - КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА 94

§ 23. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО - КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ 95

§ 24. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ, РАЗМЕРОВ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ 99

§ 25. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ 104

§ 26. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ 111

§ 27. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ 114

§ 28. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ МКТ 119

§ 29. РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА 124

§ 30. ИЗОПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ 127

§ 31. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ И УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА 131

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 141

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ 142

§ 32. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА 143

§ 33. СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ. РАБОТА И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ В ТЕРМОДИНАМИКЕ 145

§ 34. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ 150

§ 35. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ 155

§ 36. НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ 163

§ 37. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ 167

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 170

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА 171

§ 38. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ИХ СВОЙСТВА 171

Механические свойства газов 171

Электрические свойства газов 172

Тепловые свойства газов 180

§ 39. ЖИДКОСТИ И ИХ СВОЙСТВА 185

Механические свойства жидкостей 185

Тепловые свойства жидкостей 186

Электрические свойства жидкостей 196

§ 40. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА И ИХ СВОЙСТВА 200

Механические свойства твердых тел 203

Тепловые свойства твердых тел 206

Электрические свойства твердых тел 209

Магнитные свойства твердых тел 219

СТЕПАНОВА Галина Николаевна

ФИЗИКА

11 класс

II полугодие

ISBN 5-98198-006-0

9 785981 980060

Учебник
для общеобразовательных
учреждений

Редактор А. П. Степанов

Технический редактор Л. И. Длугоборская

Художник В. А. Петрова

Компьютерная верстка М. В. Усачева

Подписано в печать 20.12.2003. Формат 60×90 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная». Печать офсетная.
Печ. л. 14. Тираж 3000 экз. Заказ № 1325.

Издательство «СТП Школа».
193015, Санкт-Петербург, Тверская, 8.
Тел./факс (812) 379-1789
e-mail: stpschola@yandex.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Печатный двор»
Министерства РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15.

ST.P
S A L O H C